

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
6 octobre 2005 (06.10.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2005/093655 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ : **G06T 7/00**,
H04N 13/00, G01C 11/02

(71) **Déposant** (pour tous les États désignés sauf US) : **CEN-
TRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES** [FR/FR]; 2,
Place Maurice Quentin, F-75001 Paris (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2005/000752

(72) **Inventeur; et**
(75) **Inventeur/Déposant** (pour US seulement) : **ROUGE,
Bernard** [FR/FR]; 19, rue Bonnat, F-31400 Toulouse
(FR).

(22) Date de dépôt international : 29 mars 2005 (29.03.2005)

(25) Langue de dépôt : français

(74) **Mandataires** : **MARTIN, Jean-Jacques** etc.; Cabinet
Regimbeau, 20, rue de Chazelles, F-75847 Paris Cedex 17
(FR).

(26) Langue de publication : français

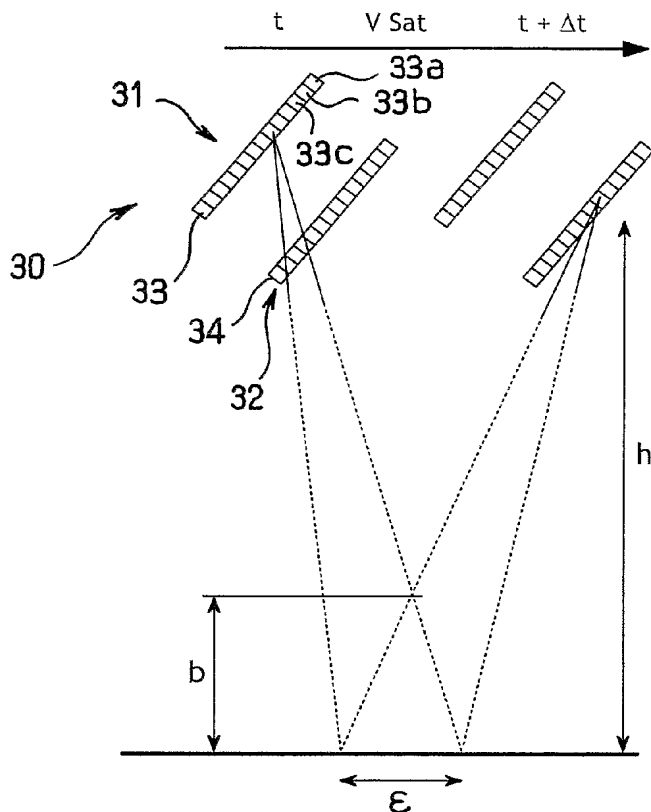
(30) Données relatives à la priorité :
0403143 26 mars 2004 (26.03.2004) FR

(81) **États désignés** (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,

[Suite sur la page suivante]

(54) **Title:** FINE STEREOSCOPIC IMAGE MATCHING AND DEDICATED INSTRUMENT HAVING A LOW STEREO-
SCOPIC COEFFICIENT

(54) **Titre :** APPARIEMENT FIN D'IMAGES STEREOSCOPIQUES ET INSTRUMENT DEDIE AVEC UN FAIBLE COEFFI-
CIENT STEREOSCOPIQUE



(57) **Abstract:** The invention relates to a method and system for the acquisition and correlation matching of points belonging to a stereoscopic pair of images, whereby the pair is formed by a first image and a second image representing a scene. According to the invention, the two images of the pair are acquired with a single acquisition instrument (30) comprising two sensors CCD (31, 32) in the optical focal plane. The matching of the acquired stereoscopic pair consists in determining, by means of correlation, the point in the second image that is homologous to a point in the first image. Said correlation is performed for a point from the first image using an optimally-sized correlation window. When the homologous point of a point from the first image has been determined, the position deviation between the point from the first image and the homologous point thereof is entered in a table. Once all of the homologous points of the points from the first image have been found, the results table is reset barycentrically. The points that do not meet a criterion are rejected, i.e. points suspected of having erroneous matching. The processing is performed at a dyadic resolution level.

(57) **Abrégé :** L'invention concerne un procédé et un système d'acquisition et d'appariement par corrélation des points d'un couple stéréoscopique d'images. Le couple est formé d'une première image et d'une deuxième image représentant une scène. Les deux images du couple sont acquises à l'aide d'un instrument d'acquisition unique (30) comprenant deux

[Suite sur la page suivante]

WO 2005/093655 A1



AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **États désignés** (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO,

SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

— relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)) pour US seulement

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale
— avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

capteurs CCD (31, 32) dans le plan focal optique. L'appariement du couple stéréoscopique acquis consiste à déterminer par corrélation l'homologue dans la deuxième image d'un point de la première image. Cette corrélation est réalisée, pour un point considéré de la première image, à l'aide d'une fenêtre de corrélation de taille optimale. Lorsque l'homologue d'un point de la première image est déterminé, l'écart de position entre le point de la première image et son homologue est placé dans un tableau. Une fois que tous les homologues des points de la première image ont été trouvés, on effectue un recalage barycentrique du tableau des résultats. Les points ne répondant pas à un critère, c'est-à-dire les points dont on suppose que l'appariement est erroné sont rejetés. Le traitement est réalisé en niveau de résolution dyadique.

APPARIEMENT FIN D'IMAGES STEREOSCOPIQUES ET INSTRUMENT
DEDIE AVEC UN FAIBLE COEFFICIENT STEREOSCOPIQUE

La présente invention concerne le domaine de la stéréoscopie. En particulier,
5 l'invention concerne un procédé et un ensemble d'acquisition et d'appariement fin d'un couple stéréoscopique d'images.

C'est-à-dire que l'invention concerne un procédé et un système permettant
l'acquisition et la mise en correspondance des points d'une première image avec les
points d'une deuxième image formant un couple stéréoscopique d'images.

PRESENTATION GENERALE DE L'ART ANTERIEUR

La stéréoscopie est un procédé donnant l'impression de relief à partir d'un couple
d'images 2D (ou deux dimensions) représentant une scène ayant été acquise avec des
15 points de vue différents.

Tel qu'illustré à la figure 3, deux images formant un couple stéréoscopique
d'images sont acquises à l'aide de deux capteurs CCD (Charge Couple Device)
(matrices ou barrettes) 15, 16 situés dans le même plan focal 19' et symétriques par
rapport à la droite A-A' passant par le centre de la scène observée et perpendiculaire au
20 plan focal 19'.

Ces capteurs CCD vont permettre l'acquisition de deux images de la scène
observée située à une certaine distance 18 des capteurs CCD.

Du fait de l'écartement 19 des deux capteurs CCD qui les ont acquises, ces deux
images ne sont pas sans relation. Ainsi, une scène verra ses images décalées d'une image
25 du couple à l'autre. Ce décalage est appelé disparité.

Le système stéréoscopique le plus élaboré à l'heure actuelle est le système visuel
humain. L'homme dispose de deux yeux situés dans le même plan focal comprenant
chacun un cristallin (système optique) et une rétine (capteur CCD). Ces yeux lui
permettent de percevoir son environnement de deux points de vue légèrement différents.

La fusion mentale de ces deux vues lui permet d'engendrer une image spatiale (3D) de son environnement.

Les méthodes de traitement d'images stéréoscopiques essaient, par des calculs mathématiques, de modéliser ce que notre cerveau fait sans difficulté. Le principe consiste dans un premier temps à mettre en correspondance les points des images du couple stéréoscopique d'images. Dans un deuxième temps, on reconstruit les coordonnées 3D des points de la scène observée en calculant l'intersection des droites passant par les points appariés et par les centres optiques des capteurs CCD.

La principale difficulté rencontrée lors de la mise en place d'une telle méthode est justement de mettre un à un en correspondance les points des images du couple. En effet, les deux images du couple n'étant pas prises sous la même incidence, un point donné de la scène dont la position dans la première image est donnée par les coordonnées $(X1, Y1)$, aura pour coordonnées $(X2, Y2)$ dans la deuxième image, avec $X1 \neq X2$ et $Y1 \neq Y2$.

Cet écart de position entre les projections sur les capteurs CCD d'un point donné de la scène observée dont les deux images se forment sur des points géométriquement non correspondants est appelé disparité géométrique. Dans la suite, le terme « d'écarts de position » sera préféré au terme « disparité » bien qu'ils aient tous deux la même signification.

Il a déjà été proposé un certain nombre de méthodes permettant l'appariement des points de 2 images prises sous 2 angles différents. Ces méthodes utilisent souvent le principe de corrélation pour faire correspondre les points d'une image à l'autre et donc déterminer les écarts de position.

Le principe de la corrélation est fondé sur la mesure d'une ressemblance locale entre deux images. Cette ressemblance locale s'effectue en introduisant des fenêtres pondérées (ou matrice de coefficients) centrées sur les voisinages homologues au sens du positionnement géométrique dans l'image. Ces fenêtres pondérées sont appelées fenêtres de corrélation.

Comme présenté sur la figure 1, le procédé consiste à se donner une fenêtre 3 de corrélation centrée sur le point 40 étudié de la première image 1, et à rechercher son homologue 41 au sens radiométrique sur la deuxième image 2. Cette opération est réalisée par déplacement (dans la deuxième image) de la fenêtre de corrélation 3 dans une fenêtre plus importante appelée aire de recherche 4. L'aire de recherche 4 est centrée sur l'homologue géométrique estimé 42 du point courant 40 de la première image. Le tableau des valeurs de corrélation obtenues constitue la nappe de corrélation. On retient alors l'écart de position pour lequel la valeur de corrélation est maximale.

Lorsque l'on effectue l'appariement des points d'un couple stéréoscopique d'images par corrélation, la première image sert de référence, et l'on cherche à retrouver, pour chaque point de la première image, son homologue radiométrique dans la deuxième image.

Cette opération est réalisée successivement sur un sous ensemble ou sur tous les points de la première image. Le point de la première image étudié à un instant donné sera dans la suite appelé point courant. Chaque point de la première image peut être considéré comme un signal que l'on cherche à retrouver dans la deuxième image par corrélation. Un point 40 de la première image et un point 41 de la deuxième image sont des homologues radiométriques s'ils correspondent au même point de la scène représentée dans les images du couple stéréoscopique.

A partir de deux images 2D formant un couple stéréoscopique d'images il est possible, une fois les points des deux images du couple appariés, de déterminer la coordonnée en Z d'un point de la scène ayant pour coordonnées (X1, Y1) dans la première image, et (X2, Y2) dans la deuxième image du couple.

En l'absence de perturbations (microvibrations par exemple) la précision sur la détermination de la troisième coordonnée d'un point de la scène aussi connue sous le nom de précision altimétrique est proche de :

$$dz = d\varepsilon / (b / h),$$

où $-d\varepsilon$ est la précision 17 de la restitution de la disparité, et

- b/h est le coefficient stéréoscopique avec
- b est la distance 19 entre les deux capteurs CCD situés dans le même plan focal, et
- h la distance 18 entre les capteurs CCD et la scène visée.

5

Les méthodes qui utilisent le principe de corrélation pour apparier chaque point de la première image avec son homologue radiométrique dans la deuxième image ne permettent pas d'obtenir une bonne précision sur la restitution de la disparité ($d\varepsilon$). En effet, le défaut majeur du procédé de corrélation est un phénomène dit « d'adhérence » aux zones les plus singulières des images du couple stéréoscopique, comme par exemple les contours. Le phénomène d'adhérence est causé notamment par la taille de la fenêtre de corrélation utilisée pour appareiller les points du couple d'images.

10

Ce phénomène d'adhérence est mis en évidence à la figure 2 sur un décalage 6 sinusoïdal de révolution de période 35 et d'amplitude ± 0.5 , la mesure 7 de ce décalage 6 par corrélation avec une fenêtre de corrélation de taille 15×15 de type prolate et la première image 9. La mesure 7 de ce décalage par corrélation fait apparaître le défaut majeur de la corrélation au niveau des contours 9, 10, 11, 12, 13, de l'image 7.

15

Par conséquent, l'utilisation du principe de corrélation pour déterminer les écarts de position entre les points de deux images stéréoscopiques nécessite d'avoir un fort coefficient stéréoscopique (b/h) afin de diminuer linéairement l'erreur altimétrique, ou erreur dans la détermination de la troisième coordonnée Z d'un point de la scène représentée dans le couple d'images. En effet, comme illustré par l'équation ci-dessus, l'erreur altimétrique est inversement proportionnelle au coefficient stéréoscopique. Inversement les faibles coefficients stéréoscopiques augmentent linéairement l'erreur altimétrique.

20

25

Un des buts de la présente invention est de fournir une méthode d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images ne présentant pas les inconvénients de la méthode précédemment décrite, et ainsi permettre la mise en place d'une méthode permettant

l'appariement précis des points d'un couple stéréoscopique d'images pour de faibles coefficients stéréoscopiques.

L'appariement des points d'un couple stéréoscopique d'images est réalisé par l'élaboration de cartes des écarts de position. La position de chaque point de la carte des écarts de position correspond à la position d'un point de la première image, et la valeur de chaque point de la carte des écart de position représentent l'écart de position entre le point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image. Par exemple, la valeur du point de coordonnées (A, B) de la carte des écarts de position est représentative de l'écart de position entre le point de coordonnées (A, B) de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image.

Comme il a été précédemment mentionné, les méthodes d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images basées sur le principe de corrélation ne permettent d'obtenir un appariement précis des points que pour un coefficient stéréoscopique fort.

Le coefficient stéréoscopique (b/h) est le rapport entre l'écartement 19 entre les deux capteurs CCD 15, 16 situés dans le même plan focal 19' (cf. figure 3), et la distance 18 entre la scène visée et les capteurs CCD.

La distance 18 entre la scène observée et les capteurs CCD dépendant de l'application, l'écartement 19 entre les capteurs CCD 15, 16 doit être prévu suffisant pour avoir un fort coefficient stéréoscopique.

Les systèmes d'acquisition et d'appariement de couple stéréoscopique d'images comprennent un système d'acquisition et un système de traitement. Ces deux systèmes sont en général distants et communiquent par des moyens de communication avec ou sans fil.

Les systèmes de traitement permettent l'appariement d'un couple stéréoscopique d'images. Ces systèmes mettent en œuvre les méthodes d'appariement d'un couple stéréoscopique. Dans le cas d'un système de traitement mettant en œuvre une méthode basée sur le principe de corrélation, il est donc nécessaire d'avoir un fort coefficient stéréoscopique pour un appariement précis des images d'un couple.

Les systèmes d'acquisition de couple stéréoscopique d'images fournissant aux systèmes de traitement les images à traiter doivent donc être conçus de sorte qu'ils respectent cette condition (coefficient stéréoscopique fort du couple d'images).

Dans le cas d'un système spatial d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images, la distance 18 entre le système d'acquisition et la scène observée est très grande.

Par conséquent, l'écartement 19 entre les capteurs CCD du système d'acquisition doit être très important pour avoir un fort coefficient stéréoscopique. L'importance de cet écartement implique que les systèmes spatiaux d'acquisition de couple stéréoscopique d'images comprennent deux instruments optiques 15', 16' (satellite) comprenant chacun un capteur CCD 15, 16.

La présence, dans les systèmes spatiaux d'acquisition, de deux instruments optiques 15', 16' comprenant chacun un capteur CCD 15, 16 induit une plus grande complexité dans l'appariement d'image, et un coût plus important pour la conception et la mise sur orbite de tels systèmes spatiaux d'acquisition.

En vision de près (appareils photos par exemple), l'acquisition d'images stéréoscopiques nécessite la présence de deux systèmes optiques dans le système d'acquisition.

Un autre but de la présente invention est de fournir un ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images comprenant un système d'acquisition simplifié permettant l'acquisition d'un couple pour un faible coefficient stéréoscopique et un système de traitement mettant en œuvre la méthode d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images selon la présente invention.

PRESENTATION DE L'INVENTION

L'invention concerne un système de traitement pour un ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images comprenant un système d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images à coefficient stéréoscopique de

quelques centièmes et le système de traitement du couple stéréoscopique acquis, le système de traitement comportant :

- des moyens aptes à traiter les deux images du couple stéréoscopique, selon au moins une direction de traitement et selon différents niveaux de résolution du plus grossier au plus fin, lesdits moyens de traitement comprenant des moyens qui, pour

chaque changement de niveau de résolution, sont aptes à :

- déterminer, en chaque point de la première image, une fenêtre de corrélation optimale,

- calculer, par corrélation avec les fenêtres de corrélation déterminées, les écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image,

- obtenir, pour le niveau de résolution courant, une carte des écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image,

- effectuer un recalage barycentrique des points de ladite carte obtenue,

- des moyens aptes à obtenir, pour le niveau de résolution le plus fin, la carte des écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image.

Des aspects préférés, mais non limitatifs du système de traitement selon l'invention sont les suivants :

- les moyens aptes à traiter les deux images du couple comprennent en outre :

- des moyens aptes à effectuer une convolution des images du couple par une fenêtre de convolution,

- des moyens aptes à effectuer un zoom de taille 2 des images du couple stéréoscopique.

- les moyens aptes à déterminer la fenêtre de corrélation optimale en chaque point de la première image comprennent :

- des moyens aptes à calculer une courbure de la première image pour chaque taille de fenêtre de corrélation,

- des moyens aptes à calculer une courbure de l'image de bruit pour chaque taille de fenêtre de corrélation,
- des moyens aptes à calculer, pour chaque taille de fenêtre de corrélation, le rapport (SNRc) des courbures précédentes,
- 5 et des moyens aptes à choisir la plus petite taille de fenêtre de corrélation telle que ledit rapport soit supérieur à un paramètre d'exhaustivité saisi par l'utilisateur.
- les moyens aptes à traiter les deux images comprennent en outre des moyens aptes à effectuer une interpolation de la deuxième image grâce à une carte des écarts de position obtenue pour un niveau de résolution précédent.
- 10 - les moyens aptes à traiter les deux images comprennent en outre :
 - des moyens aptes à rejeter les points homologues issus de fenêtres de corrélation de plus grandes tailles et contenant des fenêtres de corrélation de plus petites tailles,
 - 15 - des moyens aptes à rejeter les points homologues (40, 41) de rayons de courbure vérifiant une condition de rejet après interpolation de la deuxième image (2),
 - des moyens aptes à compléter itérativement, dans la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant, des points d'écarts de position lacunaires en fonction des points d'écarts de position existants,
 - 20 - des moyens aptes à lisser la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant par une fenêtre de convolution,
 - des moyens aptes à composer la carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution courant avec la carte des écarts de position calculée pour le précédent niveau de résolution afin de mettre à jour ladite carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution précédent.
 - 25 - le système de traitement comporte en outre des moyens aptes à rejeter les points homologues vérifiant une condition de rejet, lesdits moyens aptes à rejeter les points homologues comprenant :

- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer sur la première image les courbures de ses deux points voisins suivant chaque direction de traitement,

- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer l'écart inférieur des courbures des 4 connexes au point courant de la première image,

- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer, dans la deuxième image, son point homologue interpolé par la carte des écarts de position,

- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer l'écart entre sa courbure et celle du point homologue,

- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à rejeter le point homologue si cet écart est plus important que l'écart inférieur calculé sur la première image.

L'invention concerne également un procédé d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images à coefficient stéréoscopique de quelques centièmes, le procédé comprenant les étapes :

- de traitement grâce à des moyens de traitement des deux images du couple stéréoscopique, selon au moins une direction de traitement et selon différents niveaux de résolution du plus grossier au plus fin, en, pour chaque changement de niveau de résolution :

- déterminant, en chaque point de la première image, une fenêtre de corrélation optimale,

- calculant, par corrélation avec les fenêtres de corrélation déterminées, les écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image,

- obtenant, pour le niveau de résolution courant, une carte des écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image,

- effectuant un recalage barycentrique des points de ladite carte obtenue,

- d'obtention, pour le niveau de résolution le plus fin, de la carte des écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image.

Des aspect préférés mais non limitatifs du procédé selon l'invention sont les suivants :

- le procédé comporte en outre l'étape :
 - d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images par un instrument d'acquisition unique destiné à fonctionner avec des coefficients stéréoscopiques de quelques centièmes et comprenant deux capteurs CCD dans le plan focal optique, chaque capteur permettant l'acquisition d'une image du couple.
 - le procédé comporte en outre une étape consistant à traiter grâce à des moyens de traitement les deux images du couple stéréoscopique selon une direction épipolaire.
 - le procédé comporte une étape consistant à traiter grâce à des moyens de traitement les deux images du couple stéréoscopique selon une direction épipolaire et une direction orthogonale à la direction épipolaire.
 - le procédé comprend en outre une étape de saisie par un utilisateur d'au moins un paramètre d'exhaustivité correspondant au choix d'un rapport signal sur bruit de corrélation suivant chaque direction de traitement.
 - le procédé comporte en outre une étape d'acquisition de données comprenant l'acquisition :
 - d'une image de bruit par chaque capteur CCD,
 - du type de la fenêtre de corrélation,
 - d'une direction épipolaire pour chaque image du couple pour un coefficient stéréoscopique moyen,
 - d'au moins une valeur de l'écart de position maximum suivant chaque direction de traitement.

- le procédé comprend en outre une étape de prétraitement des données consistant à :
 - calculer un nombre de niveaux de résolution suivant chaque direction de traitement en fonction de chaque valeur de l'écart de position maximum,
 - 5 - filtrer les images du couple stéréoscopique d'images par convolution avec une fenêtre de convolution,
 - filtrer l'image de bruit par convolution avec ladite fenêtre de convolution,
 - interpoler dans une géométrie épipolaire le couple stéréoscopique d'images.
- l'étape de traitement des images comprend en outre les étapes consistant à :
 - 10 - effectuer une convolution des images du couple par une fenêtre de convolution,
 - effectuer un zoom de taille 2 des images du couple stéréoscopique.
- l'étape de détermination de la fenêtre de corrélation optimale consiste à, pour chaque point de la première image :
 - 15 - calculer une courbure de la première image pour chaque taille de fenêtre de corrélation,
 - calculer une courbure de l'image de bruit pour chaque taille de fenêtre de corrélation,
 - calculer, pour chaque taille de fenêtre de corrélation, le rapport (SNRc) des courbures précédentes,
 - 20 et à choisir la plus petite taille de fenêtre de corrélation telle que ledit rapport soit supérieur à chaque paramètre d'exhaustivité saisi par l'utilisateur.
- l'étape de traitement des images comprend en outre une étape consistant à effectuer une interpolation de la deuxième image grâce à une carte des écarts de position obtenue pour un niveau de résolution précédent.
- 25 - l'étape de traitement des images comprend en outre les étapes consistant à :
 - rejeter les points homologues issus de fenêtres de corrélation de plus grandes tailles et contenant des fenêtres de corrélation de plus petites tailles,

- rejeter les points homologues de rayons de courbure vérifiant une condition de rejet après interpolation de la deuxième image,
- compléter itérativement, dans la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant, des points d'écarts de position lacunaires en fonction des points d'écarts de position existants,
- lisser la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant par une fenêtre de convolution,
- composer la carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution courant avec la carte des écarts de position calculée pour le précédent niveau de résolution afin de mettre à jour ladite carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution précédent.
- l'étape de rejet des points homologues vérifiant une condition de rejet consiste à, pour le point courant :
 - calculer sur la première image les courbures de ses deux points voisins suivant chaque direction de traitement,
 - calculer l'écart inférieur des courbures des 4 connexes au point courant de la première image,
 - calculer, dans la deuxième image, son point homologue interpolé par la carte des écarts de position,
 - calculer l'écart entre sa courbure et celle du point homologue,
 - rejeter le point homologue si cet écart est plus important que l'écart inférieur calculé sur la première image.
- l'étape d'obtention, pour le niveau de résolution le plus fin, de la carte des écarts de position, comprend l'obtention :
 - d'au moins un tableau représentant la carte des écarts de position suivant chaque direction de traitement,
 - d'au moins un tableau représentant une carte des tailles des fenêtres de corrélation employées en tout point non rejeté de la première image, suivant chaque direction de traitement.

- les fenêtres de convolution et de corrélation utilisées sont des fenêtres de convolution et de corrélation de type prolate.

L'invention concerne également un ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images comprenant un système d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images et un système de traitement du couple stéréoscopique acquis dans lequel

le système d'acquisition du couple stéréoscopique comporte un instrument d'acquisition unique comprenant deux capteurs CCD dans le plan focal optique, chaque capteur CCD permettant l'acquisition d'une image, le système d'acquisition étant destiné à fonctionner avec des coefficients stéréoscopiques de quelques centièmes, et

le système de traitement comporte :

- des moyens aptes à traiter les deux images du couple stéréoscopique, selon au moins une direction de traitement et selon différents niveaux de résolution du plus grossier au plus fin, lesdits moyens de traitement comprenant des moyens qui, pour chaque changement de niveau de résolution, sont aptes à :

- déterminer, en chaque point de la première image, une fenêtre de corrélation optimale,

- calculer, par corrélation avec les fenêtres de corrélation déterminées, les écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image,

- obtenir, pour le niveau de résolution courant, une carte des écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image,

- effectuer un recalage barycentrique des points de ladite carte obtenue,

- des moyens aptes à obtenir, pour le niveau de résolution le plus fin, la carte des écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image.

L'invention concerne également un système d'acquisition pour un ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images comprenant le système d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images et un système de traitement du couple stéréoscopique acquis,

le système d'acquisition du couple stéréoscopique comportant un instrument d'acquisition unique comprenant deux capteurs CCD dans le plan focal optique, chaque capteur CCD permettant l'acquisition d'une image d'un couple stéréoscopique d'images, le système d'acquisition étant destiné à fonctionner avec des coefficients stéréoscopiques de quelques centièmes.

PRÉSENTATION DES FIGURES

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront encore de la description qui suit, laquelle est purement illustrative et non limitative et doit être lue en regard des dessins annexés, sur lesquels :

- La figure 1 illustre une scène représentée dans un couple stéréoscopique d'images;
- La figure 2 illustre une vue d'une scène de la composante en colonnes, d'un décalage sinusoïdal injecté, et du résultat de la mesure de ce décalage par corrélation ;
- La figure 3 illustre une vue en perspective d'un système de stéréoscopie ;
- La figure 4 illustre un graphique représentant le taux de corrélation suivant une direction d'une image de type SPOT5 en fonction de l'écart de position entre le point courant de la première image et le point courant de la deuxième image, le point courant correspondant dans chaque image au point corrélé ou point au centre de la fenêtre SPOT5 (cf. p 23) ;
- La figure 5 illustre un graphique représentant le taux de corrélation d'une fenêtre de type hypomode carré 2X2 en fonction de l'écart de position entre le point

courant de la première image et le point courant de la deuxième image, le point courant correspondant dans chaque image au point corrélé ou point au centre de la fenêtre ;

- La figure 6 illustre un graphique représentant le taux de corrélation d'une fenêtre de type prolate en fonction de l'écart de position entre le point courant de la première image et le point courant de la deuxième image, le point courant correspondant dans chaque image au point corrélé ou point au centre de la fenêtre ;
- La figure 7 illustre une vue d'une scène, des points de la scène conservés après application d'un critère en ligne, des points de la scène conservés après application d'un critère en colonne, et des points de la scène conservés après application d'un critère en ligne et en colonne ;
- La figure 8 est un graphique de la variation de la précision altimétrique en fonction du coefficient stéréoscopique pour quatre méthodes différentes d'appariement d'images stéréoscopiques (fenêtres créneaux, prolates, prolates + recalage barycentrique) ;
- La figure 9 illustre une vue d'un instrument dédié à la stéréoscopie ;
- La figure 10 illustre une vue en perspective de deux images formant un couple stéréoscopique d'images et de la scène observée ;
- La figure 11 illustre une vue d'un couple d'images présentant chacune trois réponses impulsionnelles ou fonction de transfert de modulation (FTM) ;
- La figure 12 illustre des étapes de corrélation et de recalage barycentrique du procédé d'appariement d'image.

DESCRIPTION D'UN MODE DE REALISATION DE L'INVENTION

La présente invention va maintenant être détaillée en référence aux figures 1 à 12. Les éléments équivalents représentés dans les différentes figures porteront les mêmes références numériques.

5 Le procédé ci-présenté permet le calcul de cartes précises des écarts de position entre images de couples stéréoscopiques ayant des coefficients stéréoscopiques faibles avec la même précision altimétrique que pour des coefficients stéréoscopiques forts. Ce procédé fonctionne jusqu'à des coefficients stéréoscopiques très faibles (0.01) sans dégrader la précision altimétrique.

10 On entend, dans le cadre de la présente invention, par « coefficient stéréoscopique faible », un coefficient stéréoscopique de quelques centièmes, plus précisément, un coefficient stéréoscopique inférieur à 0,1, plus précisément encore compris entre 0,1 et 0,01 (i.e. compris entre un dixième et un centième).

15 Pour acquérir et apparier un couple stéréoscopique d'images à faible coefficient stéréoscopique, on présentera un ensemble d'acquisition et d'appariement comprenant un système d'acquisition pour l'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images à faible coefficient stéréoscopique, et un système de traitement permettant le traitement du couple stéréoscopique d'images acquis.

20 L'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images à faible coefficient stéréoscopique (b/h faible) présente l'avantage de limiter les parties cachées, c'est-à-dire des parties n'apparaissant que dans l'une des deux images, et par exemple de voir le fond des rues en ville. En effet, comme l'illustre la figure 3, les parties cachées 14, sont liées à l'acquisition par un capteur CCD 15 ou 16 d'une prise de vue oblique 2D d'un objet 3D. Aussi, l'acquisition sous coefficient stéréoscopique faible permet une mise en œuvre plus automatique de la réalisation des cartes des écarts de position entre couples
25 d'images en évitant la gestion, toujours laborieuse, des parties cachées.

Les différentes étapes ayant conduit à la détermination du procédé et du système vont maintenant être présentées.

Les modèles utilisés en traitement d'image sont des modèles discrets. Cependant, il est souvent plus facile de commencer par raisonner sur un modèle continu, et de passer

ensuite au cas discret. C'est cette approche qui est utilisée dans la suite pour décrire la méthode d'appariement d'image.

1. Modélisation continue de la corrélation unidirectionnelle

La détermination du modèle continu de la corrélation unidirectionnelle va conduire à l'obtention d'une équation permettant de relier la mesure de l'écart de position effectuée par l'opération de corrélation suivant une direction de traitement en fonction de la valeur réelle de l'écart de position. Cette équation mettra en évidence le défaut précédemment indiqué de la corrélation, dit "adhérence". Un traitement permettant de limiter ce phénomène d'adhérence sera ensuite présenté. Enfin, une seconde relation, à savoir une condition morphologique directionnelle locale dont dépend la précision de l'écart de position mesuré sera également obtenue à l'issue de la modélisation continue de la corrélation unidirectionnelle.

Dans cette partie, il est fait l'hypothèse d'une direction unique des cartes des écarts de position, par exemple suivant des droites dites épipolaires, et dont une définition va maintenant être donnée. Comme illustré à la figure 10, dans un couple stéréoscopique, on définit l'ensemble des plans épipolaires comme étant l'ensemble des plans passant par les deux centres optiques C1 et C2.

Les points P, P1 et P2 font respectivement partis de la scène 38, de la première image 36, et de la deuxième image 37 du couple stéréoscopique. Il apparaît que pour tous les points de la scène 38, le point P et ses points images P1 et P2 appartiennent au même plan épipolaire 35. Les droites intersection des plans images 36 et 37 avec le plan épipolaire 35 sont les droites épipolaires. Celles-ci sont connues puisque les positions des capteurs CCD C1 et C2 sont connues.

La formulation continue du coefficient de corrélation non linéaire est effectuée dans le cas d'un couple stéréoscopique d'images faiblement bruitées. Le coefficient de corrélation suivant la direction du vecteur unité \vec{v} dans un voisinage centré en $\{t\}$ est :

$$\rho_t(\Delta t) = \frac{\int \varphi_t(x) \cdot I(x) \cdot \tilde{I}(x + \Delta t) dx}{\sqrt{\int \varphi_t(x) I^2(x) dx \int \varphi_t(x) \tilde{I}^2(x + \Delta t) dx}} = \frac{(\varphi_t \cdot I) \bullet \tilde{I}(\Delta t)}{\|I\|_{\varphi_t} \|\tilde{I}(\Delta t)\|_{\varphi_t}}$$

(\bullet est l'opérateur de corrélation, I est l'image de référence, \tilde{I} est l'image à apparier et φ la fenêtre).

5

On cherche l'écart de position vectoriel Δt qui maximise ce coefficient de corrélation. En effet, l'écart de position pour lequel la corrélation est maximale correspond à l'écart de position entre les coordonnées d'un point de la première image, et les coordonnées de son homologue radiométrique dans la deuxième image.

10

Soit $u(t)$ la fonction vectorielle qui à tout point t de l'image associe Δt . Ce coefficient de corrélation est calculé à partir d'un rapport, il est donc non linéaire. Les écarts de position étant des différences de positions locales relatives, la recherche de l'écart de position maximisant le coefficient de corrélation peut être ramenée à une recherche autour du point $t_0=0$.

15

On obtient :

$$\rho_0(u_0) = \frac{\int \varphi \cdot I \cdot \tilde{I}(x + u_0) dx}{\sqrt{\int \varphi \cdot I^2(x) dx \int \varphi \cdot \tilde{I}^2(x + u_0) dx}}$$

où $\|I\|_{\varphi_0}$ est une constante, et $u_0 = u(0) = \Delta t$, I est l'image de référence, \tilde{I} est l'image à apparier et φ la fenêtre .

20

L'objectif est de rechercher u_0 tel que ce coefficient de corrélation soit maximum. La formule $\tilde{I}(x) = I(x + \vec{e}(x))$ permet le passage d'une image du couple stéréoscopique à l'autre par un « petit » déplacement de pixels (on donnera un sens particulier au terme « petit » par la suite). Un pixel est l'élément le plus petit d'une

image auquel on puisse associer individuellement un niveau de gris représentatif d'une intensité.

En effectuant un développement limité au deuxième ordre, suivant la direction du vecteur unitaire \vec{v} centré en $\{0\}$ et après remplacement de \tilde{I} par sa valeur approchée en fonction de I , le coefficient de corrélation devient :

$$\rho_v(u_0) = 1 - \frac{\varphi_0 * [I'(x) \cdot (\varepsilon_v(x) + u_0)]^2}{2\|I\|_{\varphi_0}^2} + \frac{\varphi_0 * [I(x)I'(x) \cdot (\varepsilon(x) + u_0)]^2}{2\|I\|_{\varphi_0}^4}$$

où I' est la dérivée de I suivant \vec{v} .

Equation reliant la mesure de l'écart de position à sa valeur réelle

La recherche du maximum du coefficient de corrélation précédent conduit à rechercher l'annulation dans une direction quelconque de traitement de la dérivée de ce coefficient de corrélation.

Soit u la mesure de la valeur de l'écart de position suivant la direction \vec{v} au point t correspondant au maximum du coefficient de corrélation ($\rho'=0$) et soit ε l'écart de position réel suivant cette même direction.

L'équation fondamentale de la corrélation non linéaire est alors

$$u \cdot C = \varphi * [\varepsilon \cdot d(I, I')]$$

où $C = -\varphi * d$ est la courbure de corrélation suivant la direction \vec{v} , avec φ la fenêtre

de corrélation et $d(I, I') = \frac{I'^2 - II' A(t)}{\|I\|_{\varphi_t}^2}$ est la quasi-densité de corrélation

et $A(t) = \frac{[\varphi * II']}{\|I\|_{\varphi_t}^2}$. Elle ne dépend que de l'image de référence I et de sa dérivée.

Toutes les dérivées sont exprimées dans la direction de traitement \vec{v} .

Cette relation fondamentale de la corrélation permet de relier la mesure de l'écart de position effectué par l'opération de corrélation à la valeur réelle de l'écart de position, et ce sans passer par le calcul explicite de la corrélation, calcul toujours très coûteux en temps.

On remarque, en observant la formule permettant d'obtenir la quasi-densité de corrélation, que celle-ci est principalement fonction de I^2 . Cette quasi-densité de corrélation est donc très sensible aux contours, et plus généralement aux singularités (points où certaines quantités deviennent infinies). Pour pallier le problème d'adhérence suscité, on utilise une méthode dite de recalage barycentrique permettant de revenir à l'écart de position vrai. Cette méthode va maintenant être décrite.

Méthode de recalage barycentrique

La méthode dite de recalage barycentrique prend sa source dans la constatation suivante. L'équation fondamentale au point de coordonnée, par exemple 0, devient si l'image a une quasi-densité concentrée en $\{x_0'\}$,

$$\varepsilon(x_0') \approx -u(0)$$

Ceci signifie que la mesure au point 0 est égale à l'écart de position vrai au point $\{x_0'\}$ (au signe près). Il s'agit précisément du phénomène d'adhérence cité plus haut.

Le phénomène d'adhérence de l'image affecte au point courant l'écart de position vrai issu majoritairement d'un autre point plus singulier.

La méthode de recalage barycentrique va donc consister à rechercher la position la « plus singulière » dans la fenêtre de corrélation utilisée au point courant, et à affecter à cette position la plus singulière la valeur de l'écart de position mesurée au point courant.

La fenêtre de corrélation φ est positive et l'on se place en 0. On recherche le barycentre sur le support de φ dont la quasi-densité est $\varphi(x)d(x)$.

Il s'agit de la position :

$$\overrightarrow{OG} = \frac{\int \overrightarrow{OP}(x) \varphi(x) d(x) dx}{\int \varphi(x) d(x) dx}$$

où le vecteur \overrightarrow{OP} décrit le support de φ . Si la masse est concentrée autour du centre de gravité alors l'intégrale se restreint au voisinage du centre de gravité $V(\overrightarrow{OG})$. De plus, l'écart de position peut être considéré comme constant dans ce petit voisinage.

5 D'où

$$\int \varepsilon(x) \varphi(x) d(x) dx \approx \int_{V(G)} \varepsilon(x) \varphi(x) d(x) dx \approx \varepsilon(x) C$$

Donc

$$\varepsilon(\overrightarrow{OG}) \approx -u(0)$$

10 Tous les termes de la relation précédente sont connus et donc calculables. Il suffit d'affecter la valeur mesurée du décalage $u(0)$ au point de coordonnées G.

Une relation permettant de relier la mesure de l'écart de position effectuée par l'opération de corrélation à la valeur réelle de l'écart de position ainsi qu'un traitement permettant de palier au problème d'adhérence de la corrélation viennent donc d'être présentés. Comme indiqué dans la présentation du modèle, une seconde relation, à savoir
15 une condition morphologique directionnelle locale va maintenant être déterminée.

Condition morphologique directionnelle locale

20 La recherche du maximum de la surface de corrélation permet de retrouver à partir d'un point de la première image son homologue radiométrique dans la deuxième image.

Cette recherche du maximum implique que la dérivée seconde du coefficient de corrélation soit strictement négative afin qu'il n'y ait pas plusieurs maximums à la surface de corrélation. En effet, la présence de plusieurs maximums à la nappe de corrélation rendrait ambiguë la détermination du point homologue.

L'expression de cette dérivée seconde suivant la direction \vec{v} est appelée relation morphologique.

$$\rho''=C$$

$\rho''=C$ est appelé courbure de corrélation suivant la direction \vec{v} . La courbure doit être suffisante, et une expression quantitative en fonction du bruit va maintenant être donnée au terme "suffisante".

En admettant que la nature du bruit soit connue, par exemple un bruit Gaussien d'écart type σ et que ce bruit ait été régularisé par une Gaussienne g (écart type typique de 0.5 pas de quantification)

$$\overline{C}_b = \frac{-2\sigma^2 \|g'\| \mu(\varphi)}{\|I\|_\varphi^2}, \text{ ou } \mu(\varphi) \text{ est l'intégrale de } \varphi.$$

Alors le rapport signal à bruit de courbure de corrélation se définit par :

$$SNR_C = \left| \frac{C}{\overline{C}_b} \right| \text{ qui est indépendant de l'image.}$$

La condition de corrélation est : SNR_C supérieur à un seuil de l'ordre préférentiellement de 10 (un ordre de grandeur) qui permet de choisir les points retenus. Si cette condition est remplie, le bruit peut être négligé dans le calcul des relations fondamentales et morphologiques, et le modèle établi plus haut est applicable.

Une condition morphologique vient donc d'être établie. Cette condition morphologique ne dépend pas de l'écart de position. Il s'agit d'un résultat d'une importance pratique non négligeable. En effet, il est possible de vérifier en tout point de l'image la réalisation de cette condition et ceci sans recourir au calcul laborieux de la

corrélation elle-même. Ce résultat justifie a posteriori le choix du coefficient de corrélation pondéré.

On a donc effectué ici la modélisation continue de la corrélation non linéaire unidirectionnelle. Il reste à passer au cas discret puisque une image est une suite de points et par conséquent un modèle discret.

2. Modélisation discrète de la corrélation non linéaire unidirectionnelle

La modélisation fine du calcul du coefficient de corrélation discret conduit, comme il va être précisé ici, à :

- effectuer un zoom de facteur 2 sur le couple d'images,
- choisir un type de fonction comme fenêtre de corrélation,
- interpoler les images d'entrée et la nappe de corrélation avec un filtre sinus cardinal.

Enfin un test d'arrêt des itérations pour une direction de traitement et un calcul multi niveaux de résolution, dit multiéchelle, seront effectués.

Echantillonnage

Après avoir effectué un échantillonnage de bonne qualité, c'est-à-dire $S = R$, où S est le support spectral de l'image et R la cellule réciproque correspondant à l'échantillonnage, on calcule le coefficient de corrélation entre les images numérisées d'un couple stéréoscopique. Ce calcul nécessite de bien exprimer I^1 et I^2 qui "vivent" spectralement dans $R+R$ que l'on nommera tout simplement $2R$. Le calcul du coefficient

de corrélation $\rho_0(u_0) = \frac{(\varphi_0 \cdot I) \bullet \tilde{I}(u_0)}{\|I\|_{\varphi_0} \sqrt{\varphi * \tilde{I}^2(u_0)}}$ à partir de son numérateur et de son

dénominateur nécessite un bon échantillonnage de l'image au carré.

Une solution préférée pour calculer le coefficient de corrélation est de calculer séparément numérateur et dénominateur, puis d'en réaliser le quotient. En effet, le calcul direct fait intervenir les dérivées au carré par exemple dans l'expression faisant intervenir $I'(x)^2$ (cf. relation fondamentale).

5 Ces deux calculs ne nécessitent bien évidemment qu'en apparence le même support spectral 2S. Le calcul direct s'effectue sur des termes bien plus Haute Fréquence (HF) (terme en I^2) que celui où dénominateur et numérateur (terme seulement en I^2) sont calculés séparément avant d'en faire le quotient.

De plus, le calcul du dénominateur fait intervenir un carré de l'image.

10 Pour satisfaire aux conditions d'échantillonnage précédemment décrites, un zoom de deux sur les images du couple stéréoscopique est réalisé. Ce zoom consiste, pour chacune des images du couple stéréoscopique, à doubler le nombre de points en ligne en insérant un point de valeur inconnue entre deux points de l'image de valeurs connues, à doubler le nombre de points en colonne en insérant un point de valeur
15 inconnue entre deux points de l'image de valeurs connues, et à déterminer par interpolation les valeurs inconnues en utilisant les valeurs connues. En effet, l'interpolation sur le zoom de deux est une estimation de valeurs intermédiaires dans une série de valeurs connues. L'interpolation sur le zoom de deux des images doit être précise.

20 La méthode utilise préférentiellement des filtres séparables d'interpolation longs de type sinus cardinal pour les diverses interpolations. La taille du filtre sinus cardinal d'interpolation de l'image pour effectuer un zoom sera préférentiellement de taille 35. Un filtre de type sinus cardinal sera également utilisé pour réaliser les interpolations sur la nappe de corrélation. On prendra préférentiellement un filtre sinus cardinal de taille 11
25 pour les interpolations sur la nappe de corrélation lors de la recherche sous pixellaire du maximum de corrélation.

Une fois le zoom de deux réalisé, on calcule le coefficient de corrélation entre les images numérisées du couple stéréoscopique. Comme décrit précédemment, une fenêtre

3 de corrélation est nécessaire pour calculer le coefficient de corrélation entre les deux images du couple. Les fenêtres de corrélation peuvent être de différents types. Cependant, certains types de fenêtres minimisent l'impact de l'erreur sur la mesure des écarts de position. L'analyse ayant conduit à la détermination d'un type préféré pour la

5 fenêtre de corrélation va maintenant être présentée.

Détermination d'un type préféré pour la fenêtre de corrélation

Au voisinage du maximum, la nappe de corrélation doit être convexe afin

10 d'assurer la convergence de l'algorithme de recherche du maximum principal. En effet, si la nappe de corrélation n'est pas convexe, cela signifie que plusieurs points de la deuxième image du couple d'images peuvent potentiellement correspondre au point courant dans la première image.

Or un seul de ces points est le juste point, c'est-à-dire l'homologue radiométrique

15 vrai, du point courant de la première image. Pour une image de réponse impulsionnelle connue, le voisinage de taille maximum assurant cette propriété de convexité du maximum de la nappe va donc maintenant être recherché.

L'élément le plus fin qui puisse être trouvé sur une image est égal à la réponse impulsionnelle. Dès lors, il suffit d'étudier numériquement la forme de la nappe de

20 corrélation pour un couple d'images identiques réduites à trois réponses impulsionnelles distantes de la longueur Δl appartenant à l'intervalle en pixels $[0;7]$, et de rechercher la distance maximum entre les deux réponses impulsionnelles préservant une nappe de corrélation convexe. Alors, cette valeur correspond à l'exploration maximale possible et elle donne un sens à la notion d'écart de position dit "petit" utilisée en introduction du

25 modèle d'images.

L'analyse 1D est suffisante dans le cas de réponses impulsionnelles séparables. Pour réaliser l'analyse 1D, on prend deux images 1,2 identiques présentant des réponses impulsionnelles 301, 302, 303 distantes de Δl 304, comme illustré à la figure 11. Le fait

de prendre deux images identiques pour former le couple stéréoscopique d'images induit que les homologues géométrique et radiométrique dans la deuxième image d'un point de la première image sont confondus. On fait ensuite glisser suivant la direction d'analyse, la fenêtre 3 de corrélation le long de la deuxième image 2.

5 Pour chaque déplacement de 1 point de la fenêtre de corrélation 3, on calcule la corrélation. On obtient les graphiques des figures 4, 5 et 6 présentant le taux de corrélation entre les deux images identiques en fonction de la position de la fenêtre 3 de corrélation sur la deuxième image.

10 L'abscisse $x=0$ correspond au cas 300 où la fenêtre de corrélation est placée sur l'homologue géométrique du point courant de la première image, c'est-à-dire que l'on mesure le coefficient de corrélation entre un point de la première image et son homologue radiométrique vrai dans la deuxième image.

L'abscisse $x=1$ correspond au cas où la fenêtre de corrélation est décalée dans la deuxième image de 1 point par rapport à la position de l'homologue radiométrique vrai.

15 L'abscisse $x=2$ correspond au cas 310 où la fenêtre de corrélation est décalée dans la deuxième image de 2 points par rapport à la position de l'homologue radiométrique vrai, et ainsi de suite.

20 Les résultats de la corrélation sont donnés aux figures 4, 5 et 6 pour les cas SPOT 5 THR (figure 4), Hypomode standard (agglomération par paquet de 2×2 des pixels tout en conservant le même échantillonnage) (figure 5) et prolate (figure 6). Ces figures sont des graphiques. Les fonctions tracées dans ces graphiques représentent les nappes de corrélation.

25 Comme on peut le remarquer à la figure 4, avec une fenêtre de corrélation de type SPOT5, l'écart de position maximum entre deux réponses impulsionnelles pour conserver une nappe convexe (i.e. présentant un seul maximum) est d'un pixel. Il faudra donc avoir une zone d'exploration ne dépassant pas le pixel. En effet, pour la distance $\Delta l = 1$, on a une nappe de corrélation convexe. Par contre, pour la distance $\Delta l = 2$, on a plusieurs maximums à la nappe de corrélation.

Comme illustré à la figure 11, ces maximums correspondent au cas 300 où la fenêtre de corrélation 3 est placée sur l'homologue radiométrique vrai du point courant de la première image, et à d'autres cas où la fenêtre de corrélation est décalée par rapport à l'homologue radiométrique vrai.

5 On peut observer quatre maximums secondaires pour $x=2$, $x=-2$, $x=4$ et $x=-4$. Le cas 310 est obtenu pour $x=2$, c'est-à-dire lorsque la fenêtre de corrélation est décalée par rapport à l'homologue vrai dans la deuxième image 2. Ce décalage est de deux points suivant la direction de traitement.

10 Le cas 320 est obtenu pour $x=-2$, c'est-à-dire lorsque dans la deuxième image, le décalage de la fenêtre de corrélation par rapport à l'homologue vrai est de deux points dans la direction opposée à la direction de traitement. Les cas 320 et 330 sont obtenus pour $x=4$ et $x=-4$.

15 Pour ces quatre cas 310, 320, 330 et 340, on a quatre maximums à la nappe de corrélation. La nappe de corrélation nous donne donc cinq points homologues au point courant de la première image. Or un seul de ces homologues mesurés est l'homologue vrai du point courant de la première image. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'assurer la convexité de la nappe de corrélation. Avec une fenêtre de type SPOT 5, l'écart de position maximum pour conserver une nappe de corrélation convexe est donc de 1 pixel.

20 Comme on peut le remarquer à la figure 5, l'hypomodisation standard permet une exploration de 2 pixels. Cela signifie que l'écart de position maximum que l'on peut observer entre deux points homologues est de deux pixels.

Comme on peut le remarquer à la figure 6, la fonction prolate permet une exploration de 4 pixels.

25 La solution prolate assure la meilleure convexité élargie de la nappe de corrélation et de fortes propriétés de continuité sur la mesure des écarts de position. La fonction prolate possède la propriété d'être la fonction positive dont les supports sont les plus concentrés simultanément en espace et en fréquence. Une méthode préférée utilisera donc une fonction prolate comme fenêtre de corrélation.

Il vient d'être démontré que certains types de fenêtres minimisent l'impact de l'erreur sur la mesure des écarts de position. Cette recherche de la précision de mesure conduit à opter préférentiellement pour une fenêtre de corrélation égale à la fonction prolate (le lecteur aura compris que l'on peut opter pour un autre type de fenêtre de corrélation tel qu'une fenêtre de corrélation de type hypomode, spot5, ou tout autre type de fenêtre de corrélation connue de l'homme de l'art). Par ailleurs, le phénomène d'adhérence est d'autant plus faible que les fenêtres sont de support spatial réduit (i.e de taille réduite). Pour minimiser le phénomène d'adhérence, on utilisera donc une fonction prolate de taille la plus petite possible compatible avec les conditions d'application du modèle de corrélation fine précédemment décrit et rappelé ci-dessous.

Détermination en chaque point d'une taille optimale de la fenêtre de corrélation

Il a précédemment été défini un seuil morphologique SNR_C lié à la précision de la corrélation. De plus, l'impossibilité de résoudre l'équation fondamentale a été indiquée. Ceci conduit à rechercher des fenêtres de taille (ou dimension) la plus petit possible compatible avec ce seuil SNR_C .

Cette approche conduit à rechercher la prolate de support spatial le plus faible, c'est-à-dire de support spectral le plus important, remplissant la condition morphologique dans la direction de traitement. Une adaptation de la fenêtre en tout point pour remplir au mieux la relation morphologique fondamentale va maintenant être proposée :

- Soit la suite de fonctions prolate $\{P_n\}$ associée à la suite de supports spectraux circulaires décroissants $\{\varphi_n\}$.
- Soit φ_0 égal à C le cercle inscrit dans 2R support spectral le plus grand possible sur l'image de zoom 2.

Alors, la recherche de la fenêtre optimale se résume à trouver en tout point la fenêtre de corrélation de type prolata de support spectral circulaire maximal appartenant à la suite $\{P_n\}$ et vérifiant la condition morphologique. Ceci est réalisé simplement par essais successifs des fonctions prolata de supports spectraux décroissants.

Le lecteur aura compris qu'une fenêtre de support spectral maximum est une fenêtre de support spatial minimum. Par conséquent, on cherchera la fenêtre de corrélation de type prolata de taille (support spatial) la plus petite vérifiant la condition morphologique décrite précédemment.

Traitement multiéchelle

La limite d'exploration imposée par le type de fenêtre de corrélation d'une part, et par la recherche en tout point de la taille de fenêtre la plus petite d'autre part, ne permettent pas de déterminer les points homologues radiométriques d'un couple stéréoscopique lorsque l'écart de position entre ces points est important.

Ce résultat conduit à envisager un traitement en niveaux de résolution (multiéchelle), car il permet par variation de la résolution de l'image de préserver les conditions de convexité de la nappe quelle que soit l'amplitude de l'écart de position recherché. Une variation de la résolution est une variation de la définition du pixel.

Par exemple, si une image est représentée sur un écran de 21 cm en ligne et 18 cm en colonne. Et si cette image présente 210 pixels en ligne et 180 pixels en colonne, alors cette image présente un niveau de résolution de 10 pixels par centimètre. Une diminution du niveau de résolution (passage d'un niveau de résolution fin à un niveau de résolution plus grossier) va correspondre à une diminution du nombre de pixels en ligne et en colonne pour représenter l'image. Pour une diminution de 10 du niveau de résolution, on n'aura plus que 21 pixels en lignes et 18 en colonne, soit un niveau de résolution de un pixel par centimètre.

L'approche multi niveaux de résolution (multiéchelle) dyadique est nécessaire pour remplir la condition de convexité de la nappe de corrélation quelle que soit

l'amplitude des écarts de position. Le couple d'images est dégradé en résolution (i.e. on diminue le niveau de résolution) par convolution par une prolate de support spectral de rayon r_C/s , où « r_C » est le rayon correspondant à l'image zoomée d'un facteur 2, et « s » est le niveau de résolution courant.

5 La descente en niveau de résolution nécessite de boucher les trous, c'est-à-dire d'estimer la valeur des points non renseignés des cartes des écarts de position. Un point non renseigné est un point de la carte des écarts de position dont on ne connaît pas la valeur. Les trous sont bouchés itérativement par convolution avec une prolate circulaire de rayon 7 par exemple. A chaque itération les points manquants sont tour à tour
10 renseignés. Ainsi est calculé une carte exhaustive des écarts de position entre les points de la première image et leur homologue radiométrique dans la deuxième image. L'itération à chaque niveau de résolution consiste par interpolation successive à corriger géométriquement à l'aide de cette carte suivant une direction, par exemple la direction épipolaire, la deuxième image pour la rendre de plus en plus semblable
15 géométriquement à la première image.

En outre, il est possible – si le cas épipolaire n'est pas pur – d'explorer successivement les directions orthogonales (ligne et colonne), de calculer successivement des écarts de position monodirectionnels par corrélation, et d'effectuer les interpolations unidirectionnelles correspondantes. La connaissance des écarts de
20 position maximaux en ligne et colonne induisent une profondeur de traitement en niveau de résolution potentiellement différents suivant les lignes et les colonnes. Le nombre de niveaux de résolution dyadiques nécessaires est :

$$\begin{array}{ll} \text{- en ligne} & : \quad s_l = \log_2(\max_l), \\ \text{- et en colonne} & : \quad s_c = \log_2(\max_c), \end{array}$$

25 où \max_l et \max_c sont les écarts de position maximaux respectivement en ligne et colonne.

A chaque niveau de résolution, les opérations d'interpolation de la deuxième image, suivant les cartes des écarts de position monodirectionnels successives calculées,

nécessitent l'application d'une formule de composition des cartes des écarts de position. Après chaque itération est effectuée la composition entre la carte des écarts de position entre l'image interpolée et la première image et la carte des écarts de position qui a permis de générer l'image interpolée (c'est-à-dire la carte des écarts de position de l'itération précédente). Ainsi, les erreurs d'interpolation ne se cumulent-elles pas à travers les itérations car nous sommes toujours dans le cas de la composition de deux écarts de position au maximum.

La disparité composée avec recalage barycentrique après deux itérations s'exprime de la manière suivante (sachant que la première est toujours régularisée et sans trous de corrélation) :

- Soit ε_1 la première carte des écarts de position entre l'image \tilde{I} et la première image I . Cette fonction est continue et régulière.
- Soit $\tilde{I}_1(n) = \tilde{I}(n + \varepsilon_1(n - \xi_1))$ l'image \tilde{I} corrigée des écarts de position ε_1 de barycentre ξ_1 où $u_1(n) \approx -\varepsilon_1(n - \xi_1)$ et $\tilde{I}_2(m) = \tilde{I}_1(m + \varepsilon_2(m - \xi_2))$, l'image \tilde{I}_1 corrigée des écarts de position ε_2 de barycentre ξ_2 où $u_2(m) \approx -\varepsilon_2(m - \xi_2)$. $u_1(n)$ et $u_2(m)$ sont les mesures d'écarts de position mesurés barycentriquement, alors :

$$\tilde{I}_2(m) = \tilde{I}_1(m + \varepsilon_2(m - \xi_2)) = \tilde{I}(m + \varepsilon_2(m - \xi_2) + \varepsilon_1(m + \varepsilon_2(m - \xi_2) - \xi_1)) .$$

Critère de rejet des points mal appariés

Il a été précédemment fait mention de points non renseignés. Un point non renseigné est un point de la première image dont l'appariement avec un point de la deuxième image a été rejeté (c'est-à-dire un point dont on suppose que l'appariement est erroné). Le critère de rejet des points de fausse corrélation consiste à comparer point à point les courbures de corrélation entre la première image et la deuxième image corrigée des écarts de position (interpolée dans la grille de référence).

Un point est rejeté à chaque niveau de résolution quand l'écart entre les valeurs de courbures entre les deux images est supérieur à une valeur. Cette valeur est égale au minimum d'écart aux 4 points connexes du point courant de la première image (les points connexes du point courant sont les points voisins du point courant situés au dessus, en dessous, à droite et à gauche du point courant).

Enfin, pour chaque direction de traitement et pour le niveau de résolution de l'image, les points calculés à partir de prolate de supports contenant une prolate de supports plus petits sont éliminés car la corrélation en ces points est de précision obligatoirement plus faible.

3. Méthode de corrélation fine bidirectionnelle

Le cas de la méthode de corrélation fine unidirectionnelle a été exposé ci-dessus pour faciliter la compréhension du modèle. Le cas de la méthode de corrélation fine bidirectionnelle va maintenant être présenté.

Les images du couple stéréoscopique sont rééchantillonnées en géométrie épipolaire suivant les lignes ou les colonnes par interpolation. La recherche des tableaux de disparité 2D est effectuée alternativement suivant les lignes et les colonnes. La difficulté majeure de restitution de la table des écarts de position est généralement celle suivant la direction épipolaire.

Les écarts de position provoqués par le relief sont en général très haute fréquence alors que ceux suivant la direction orthogonale sont souvent provoqués par des vibrations du porteur et sont basse fréquence. Ceci autorise des fenêtres de traitement de plus grandes tailles suivant la direction perpendiculaire aux épipolaires. Cette différence sera naturellement gérée par le choix d'un rapport signal à bruit plus important suivant la direction orthogonale aux épipolaires que suivant la direction épipolaire.

La condition fondamentale unidirectionnelle si \vec{v} est la direction épipolaire est la relation unique :

$$C_v / \overline{C}_b > SNR_c$$

La figure 7 présente le masque 23 des points conservés après application du critère de la courbure géométrique sur l'image de type campagne 20 avec une fenêtre 9x9 de type prolate. Ce masque 23 des points conservés est obtenu en faisant l'intersection du masque 21 des points conservés après application du critère en ligne, avec le masque 22 des points conservés après application du critère en colonne.

Les zones noires de l'image correspondent aux points ayant été rejetés après application de la condition morphologique. Les points en blanc représentent les points conservés. Les images de la figure 7 sont représentées en noir et blanc pour une meilleure visualisation des points conservés.

Comme l'illustre la figure 7, le masque 21 appliqué en ligne présente 57.29% de points conservés, le masque 22 appliqué en colonne présente 53.52% de points conservés, enfin, le masque 23 intersection des deux précédents présente seulement 45.64% de points conservés. Cette illustration confirme l'avantage non négligeable de l'utilisation du repère épipolaire qui implique une condition morphologique unidirectionnelle.

4. Méthode de corrélation fine multidirectionnelle

L'image ainsi interpolée est ensuite analysée suivant sa direction orthogonale. Ce procédé est itéré.

5. Procédé d'appariement mis en place à partir du modèle de corrélation fine

Le procédé de calcul basé sur la méthode de corrélation fine précédemment décrite va maintenant être détaillé en référence à la figure 11. Le procédé de corrélation s'adapte automatiquement à l'image dès que l'on a fixé le rapport signal à bruit de courbure de corrélation SNR_c .

Ce procédé de calcul est multi niveaux de résolution (multiéchelle) dyadique. Cela signifie que le traitement aura lieu pour différents niveaux de résolution. Le nombre de niveaux de résolution est connu dès que l'écart de position maximale le long de la ligne et le long de la colonne l'est.

5 Le procédé de calcul basé sur la méthode de corrélation fine est multidirectionnel. Les tailles de fenêtres de corrélation (prolate) sont calculées automatiquement en tout point et à tous les niveaux de résolution avec des fenêtres de corrélation qui peuvent être très différentes dans la direction épipolaire et la direction orthogonale. Elles sont fixées par le rapport signal à bruit de courbure de corrélation
10 différent suivant la direction épipolaire et la direction orthogonale. On procédera en niveaux de résolution croissants, c'est-à-dire du plus grossier au plus fin.

A Données :

15 La première étape du procédé consiste à l'acquisition des données d'entrée. Pour utiliser le procédé, les données nécessaires en entrée sont les suivantes :

- le couple stéréoscopique d'images, à savoir la première image et la deuxième image. Ces deux images sont acquises à l'aide d'un système d'acquisition particulier décrit plus précisément dans la suite du document. Ce système permet
20 l'acquisition d'un couple d'images pour un faible coefficient stéréoscopique. Ce système d'acquisition est un instrument unique comprenant 2 capteurs CCD, chaque capteur permettant l'acquisition d'une image du couple stéréoscopique.
- l'écart type du bruit et le type de fonction FTM (donnée) : à savoir « prolate », « spot5 », « hypomode »...
- 25 - les images du couples sont exprimées en direction épipolaire ligne ou colonne,
- la valeur de l'écart de position maximum suivant les épipolaires et la valeur de l'écart de position maximum suivant la direction orthogonale. Ces valeurs représentent les seuils maximums du décalage, suivant les deux directions de

traitement, entre un point de la première image et son homologue dans la deuxième image. Ces valeurs vont permettre de déterminer le nombre de niveaux de résolution nécessaires pour trouver l'homologue dans la deuxième image d'un point de la première image.

5

B Paramètres utilisateurs

A l'étape suivante, l'utilisateur est invité à entrer un paramètre d'exhaustivité pour le procédé:

- 10 - le choix d'un rapport signal sur bruit (SNR) talon de corrélation suivant la direction épipolaire et le choix d'un SNR talon de corrélation suivant la direction orthogonale : SNR_e, SNR_o. Préférentiellement on proposera SNR_e=10 et SNR_o=100. Ces paramètres SNR_e et SNR_o vont servir de valeurs seuils dans la détermination en chaque point de la première image, d'une taille optimale pour la fenêtre de corrélation suivant chaque direction de traitement.
- 15

C Paramètres algorithmiques

Un certain nombre d'autres paramètres sont pré-réglés :

- 20 - le rayon maximum de la prolata circulaire de corrélation. Ce rayon est le seuil définissant la taille maximum autorisée pour la fenêtre de corrélation. Ce rayon maximum sera préférentiellement égal à 25 pour un zoom image de 2.
- le nombre d'itérations pour chaque direction de traitement, préférentiellement égal à 2.
- 25 - le nombre d'itérations, lors du comblement de parties lacunaires de la carte des écarts de position. En effet, le procédé permet de définir les écarts de position entre les points de la première image et leurs homologues respectifs dans la deuxième image. Tous les écarts de position mesurés sont placés sur une carte

des écarts de position. Cependant, parmi ces écarts, ceux qui ne répondent pas à un critère de ressemblance sont rejetés. La carte des écarts de position présente donc des points pour lesquels l'écart de position entre un point de la première image et son homologue dans la deuxième image n'est pas renseigné. Ces points non renseignés de la carte des écarts de position sont appelés parties lacunaires, et le nombre d'itérations lors du comblement de ces points est préférentiellement égal à 10.

- le zoom de 2 des images du couple à tous les niveaux de résolution.

D Initialisation

A partir des données d'entrée, certains paramètres sont initialisés.

On effectue donc le calcul du nombre de niveaux de résolution suivant la direction épipolaire S_e et la direction orthogonale S_o en fonction des valeurs des écarts de position maximums (suivant les deux directions de traitement) obtenues lors de la phase A. Le nombre de niveaux de résolution dyadiques nécessaire est calculé à l'aide de la formule du logarithme à base 2 des écarts de position maximums en ligne et colonne précédemment citée :

- $s_e = \log_2(\text{valeur maximum du décalage selon la direction épipolaire}),$
- $s_o = \log_2(\text{valeur maximum du décalage selon la direction orthogonale}),$

Par ailleurs, les images d'entrée doivent être filtrées, lors du premier passage dans la boucle principale de traitement du procédé de corrélation. Ceci permet d'atténuer le bruit des images d'entrée. On effectue donc un :

- filtrage du couple stéréoscopique d'images par convolution avec une fenêtre de convolution. Cette fenêtre de convolution sera préférentiellement une protale circulaire de rayon égal à 7. Cette opération de filtrage de la première et de la deuxième image du couple permet de régulariser les points de ces images.

- filtrage de l'image de bruit par convolution avec une fenêtre de convolution. Cette fenêtre de convolution sera préférentiellement de type prolata circulaire de rayon préférentiellement égal à 7. L'intérêt de cette opération est là encore de régulariser les points de l'image de bruit.
- interpolation dans la géométrie épipolaire du couple d'images. Les images du couple stéréoscopique sont rééchantillonnées en géométrie épipolaire suivant les lignes ou les colonnes par interpolation.

E Traitement pour chaque niveau de résolution

On effectue alors le traitement des images du couple stéréoscopique en niveaux de résolution dyadique, alternativement si besoin, suivant la direction épipolaire et orthogonale à la direction épipolaire (fonction de la profondeur de traitement en niveaux de résolution suivant la ligne et la colonne). Pour le traitement, on commence par le niveau de résolution le plus grossier et on passe progressivement au niveau de résolution le plus fin. Les étapes qui suivent seront effectuées pour chaque niveau de résolution et se divisent en deux catégories qui sont la préparation des données et la corrélation des images stéréoscopiques :

E.1 Préparation des données

L'étape de préparation des données est effectuée en réalisant les étapes suivantes :

- la convolution des images du couple par la prolata (prolata circulaire de taille préférentiellement égale à 7 pour le niveau de résolution 1, prolata séparable pour les autres). Cette convolution permet la diminution de la résolution des images de départ du couple.
- le zoom de deux de la première image, de la deuxième image et de l'image de bruit. Ce zoom de deux est réalisé par interpolation à l'aide d'une fonction de

type sinus cardinale. L'opération d'interpolation consiste à, pour chaque image interpolée :

- doubler le nombre de points en ligne en insérant un point de valeur inconnue entre deux points de l'image de valeurs connues.
- 5 ○ doubler le nombre de points en colonne en insérant un point de valeur inconnue entre deux points de l'image de valeurs connues.
- déplacer une fenêtre pondérée de type sinus cardinale en chaque point de valeur inconnue (le point de valeur inconnue étant situé au centre de la fenêtre) et estimer la valeur de ce point grâce aux points de valeurs
- 10 connues grâce à cette fenêtre pondérée.
- la détermination de la fenêtre de corrélation optimale (i.e. de taille la plus petite). Pour cela, on effectue le calcul en tout point de la première image du rapport signal sur bruit de courbure de corrélation SNR_c en fonction de la fenêtre de corrélation (prolate circulaire). Puis on choisit la plus petite fenêtre de
- 15 corrélation, suivant la direction épipolaire et perpendiculaire, vérifiant la condition $C_v / C_b > SNR_c$. Cette détermination est effectuée en réalisant, en chaque point de l'image, les étapes suivantes:
- calcul de la courbure de corrélation du bruit C_b sur l'image de bruit pour chaque taille de fenêtre de corrélation de type prolate. Ce calcul est
- 20 réalisé en utilisant la formule de la courbure de corrélation citée lors de la présentation du modèle de corrélation fine unidirectionnelle,
- calcul de la courbure de corrélation de la première image pour chaque taille de fenêtre de corrélation de type prolate,
- calcul pour chaque fenêtre de corrélation de type prolate du rapport signal
- 25 sur bruit de courbure de corrélation (SNR_c) rapport des courbures précédentes,
- choix (et stockage en mémoire) de la plus petite taille de fenêtre de corrélation de type prolate tel que $|C_v / C_b| > SNR_{_e}$ et

$|C_v / C_b| > SNR_{_o}$ (par exemple, si une fenêtre de corrélation de taille 16x16 et une fenêtre de corrélation de taille 8x8 vérifient $|C_v / C_b| > SNR_{_e}$ et $|C_v / C_b| > SNR_{_o}$, on choisira la fenêtre de corrélation de taille 8x8).

5

E.2 Corrélation des images stéréoscopiques

Une fois les données préparées, on effectue l'étape de traitement des données. Cette étape comprend les sous étapes qui suivent, dont certaines sont illustrées à la figure 12. Ces sous étapes sont réitérées pour chaque point de l'image et suivant chaque direction de traitement :

10

Pour chaque point de la première image, et pour chaque direction de traitement, on effectue :

15

- l'interpolation de la deuxième image avec la carte des écarts de position cumulés trouvée à l'itération précédente, c'est-à-dire pour le niveau de résolution précédent. Cette interpolation de l'image 2 est faite à l'aide de la carte des écarts de position.

20

- le calcul (3000) de l'écart de position d entre le point courant 2002 de la première image 2000 et son homologue radiométrique 2004 supposé dans la deuxième image 2001. Ce calcul est effectué par corrélation dans la fenêtre de corrélation 2003 pondérée. Pour cela, on centre la fenêtre de corrélation 2003 sur le point courant 2002 de la première image 2000, et on déplace la fenêtre de corrélation 2003 dans l'aire de recherche 2006 de la deuxième image 2001. L'aire de recherche 2006 est centrée sur l'homologue géométrique O (dans la deuxième image) du point courant 2002 de la première image 2000. On retient l'écart de position pour lequel la valeur de corrélation est maximale.

25

Ce calcul est réalisé pour tous les points de la première image 2000 et permet l'obtention d'une carte des écarts de position intermédiaire 2005 (c'est-à-dire une carte où la technique de recalage barycentrique notamment n'a pas été réalisée). On effectue ensuite :

- 5 - le recalage barycentrique (3001) à chaque niveau de résolution au point près de la carte des écarts de position intermédiaire 2005. Ceci permet de limiter l'impact du phénomène d'adhérence de la corrélation précédemment présenté.

10 L'étape de recalage barycentrique, en un point, comprend les sous étapes consistant à :

- 15 o déterminer le barycentre G des points de la première image 2000 contenus dans la fenêtre de corrélation 2003 ayant servi pour la détermination de l'écart de position entre le point courant 2002 de la première image 2000 et son homologue 2004 dans la deuxième image 2001,
- o assigner à ce barycentre G la valeur de l'écart de position d du point courant dans la carte des écarts de position 2005.

20 Ainsi, lors de l'étape de recalage barycentrique, la valeur de l'écart de position calculée pour le point courant est décalée, dans la carte des écarts de position, à la position du barycentre des points de la première image contenus dans la fenêtre de corrélation (utilisée pour le calcul de l'écart de position entre le point courant et son homologue radiométrique supposé).

Une fois le recalage barycentrique effectué

- 25 - Pour une même résolution :
- le rejet des points issus de fenêtres de taille plus importante et contenant des fenêtres de taille plus petite. En effet, la corrélation en ce point à l'aide de la fenêtre de corrélation de plus grande taille est de précision obligatoirement plus faible.

- le rejet des points homologues de rayons de courbure trop différents après l'interpolation de la position de la deuxième image. Pour cela, on va effectuer pour chaque résolution et direction :

- le calcul de la courbure de corrélation du point courant (point étudié) de la première image,
- le calcul de la courbure de corrélation de l'homologue dans la deuxième image du point courant de la première image,
- le calcul de la différence entre les deux courbures précédemment calculées (écart entre les courbures de corrélation du point courant et de son homologue dans la deuxième image),
- le calcul de l'écart de courbure minimum entre les courbures de corrélation des quatre voisins (dans la première image) au point courant et la courbure de corrélation du point courant.
- le rejet du point homologue si l'écart de courbure entre le point courant et son homologue est plus important que l'écart inférieur calculé sur les quatre voisins du point courant de la première image.

- le rebouchage itératif (préférentiellement 10 itérations) des cartes des écarts de position lacunaires en passant par les points existants. En effet, on a vu que les points homologues d'écarts de courbure trop différents étaient rejetés. Par conséquent certains points de la carte des écarts de position vont être non renseignés. On effectue donc un rebouchage itératif de la carte des écarts de position. De plus le recalage barycentrique produit des trous (points de la carte où l'écart de position n'est pas renseigné), puisque l'écart de position d'un point peut être assigné (ou translaté) à un autre point lors du recalage barycentrique.

Pour cela, on effectue :

- la convolution par une fenêtre de convolution de type prolate,
- le rebouchage des points non renseignés de la carte des écarts de position par convolution par une prolate.

- le lissage de la carte des écarts de position par une prolata séparable correspondant au niveau de résolution courant (circulaire au niveau de résolution de l'image). Ce lissage permet de débruiter la carte des écarts de position.
- à la composition de la table des écarts de position courante avec celle calculée à la précédente itération (cumul). Cette composition permet de mettre à jour la table des écarts de position calculée pour le niveau de résolution précédent.

On effectue le traitement pour tous les niveaux de résolution en éliminant les points calculés avec une fenêtre de corrélation prolata contenant une fenêtre de corrélation prolata plus petite et ceci suivant les deux directions de traitement. On obtient alors en sortie du procédé la carte des écarts de position pour le niveau de résolution le plus fin.

F Sorties

On obtient à la dernière étapes du procédé les données de sortie du procédé. Il s'agit de tableaux de tailles égales à la taille de la première et de la deuxième image. Ces tableaux sont :

- la carte des écarts de position (2 tableaux),
- la carte des tailles de prolates (2 tableaux) en tout point renseigné (non rejeté) de la première image au niveau de résolution le plus fin (le niveau de résolution le plus fin étant le niveau de résolution des images d'entrée).

Le procédé présenté ci-dessus est mis en œuvre dans un ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images. Cet ensemble d'acquisition et d'appariement comprend un système d'acquisition et un système de traitement. Cet ensemble d'acquisition et de traitement permet l'acquisition et le traitement d'un couple stéréoscopique d'images à faible coefficient stéréoscopique. L'ensemble d'acquisition et de traitement présente l'avantage de limiter les parties cachées, c'est-à-dire des parties

n'apparaissant que dans l'une des deux images, et par exemple de voir le fond des rues en ville.

Le système d'acquisition peut être intégré ou distant du système de traitement. Lorsque les systèmes d'acquisition et de traitement sont distants, ils communiquent par des moyens de communication avec ou sans fil.

Le système d'acquisition permet l'acquisition des données d'entrées du procédé (étape A du procédé). Ce système d'acquisition est par exemple un satellite et comprend des moyens de communication (pour la communication avec le système de traitement), des moyens de traitement (de type processeur), des moyens mémoire (pour stocker les images acquises) et un capteur optoélectronique (système optique + capteurs CCD).

Le système de traitement est programmé pour mettre en œuvre les étapes du procédé d'appariement décrit précédemment. Ce système de traitement permet quant à lui de réaliser l'appariement du couple stéréoscopique d'images. Le système de traitement est par exemple une station de travail comprenant des moyens mémoires (RAM, ROM) connectés à des moyens de traitement tel qu'un processeur, des moyens de visualisation tels qu'un écran d'affichage et des moyens de saisie tels qu'un clavier et une souris. Le système de traitement est connecté avec des moyens de communication afin de recevoir les images à apparier acquises par le système d'acquisition.

Une comparaison de la méthode de corrélation fine avec des méthodes ne faisant pas intervenir le zoom de 2 du couple stéréoscopique d'images, la modélisation de la corrélation avec la recalage barycentrique, et le calcul multi niveaux de résolution (ou multiéchelle) du maximum de la nappe de corrélation est proposée, à partir de simulations représentées à la figure 7.

Les résultats obtenus pour quatre méthodes d'appariement d'images stéréoscopiques sont présentés (fig. 8 précision en fonction du b/h), ces méthodes étant : la méthode de corrélation standard par une fenêtre de corrélation de type prolate 26, la méthode de corrélation standard par une fenêtre de corrélation de type constante 25, la méthode de corrélation fine par une fenêtre de corrélation de type prolate 27, et la

méthode de corrélation fine par une fenêtre de corrélation de type prolate en enlevant les points issus de fenêtres incluant des fenêtres plus petites 28.

Les images du couple sont des images de Marseille de pas d'échantillonnage un mètre avec une fonction de transfert respectant quasiment le principe de Shannon (valeur
5 proche de 0 à la fréquence de coupure). Le rapport signal à bruit des images est égal à 100.

L'acquisition des images du couple stéréoscopique est matricielle. Ces images sont calculées à partir d'une orthophotographie échantillonnée à un mètre et d'un modèle numérique de terrain de précision submétrique couvrant la même zone.

10 Des couples d'images stéréoscopiques sont générés pour plusieurs b/h. Ce coefficient prend des valeurs entre 0.005 et 0.25. Ce coefficient est provoqué par le seul dépointage en tangage.

Comme représenté à la figure 8, la précision avec la méthode de corrélation fine est deux fois meilleure que celle mesurée avec les méthodes classiques. De plus, on peut
15 considérer que la corrélation fine est de précision constante pour des b/h entre 0.01 et 0.15. La précision altimétrique dont l'écart type est ici présenté en ordonnée avec comme unité le pixel est meilleure que le pixel. Cette méthode conserve une précision subpixellaire avec de faibles coefficients stéréoscopiques (b/h).

Par ailleurs, la méthode préconisée dite de corrélation fine sans inclusion de
20 fenêtres permet de rejeter les points d'ombres qui sont souvent aberrants. Le taux de corrélation est proche de 1 si l'on néglige le phénomène d'ombre.

Le procédé d'appariement d'images stéréoscopiques décrit ci-dessus permet donc le traitement d'images stéréoscopiques pour un faible coefficient stéréoscopique (b/h faible) avec la même précision altimétrique que pour des coefficients
25 stéréoscopiques forts. Ce procédé fonctionne jusqu'à des coefficients stéréoscopiques très faibles (0.01) sans dégrader la précision altimétrique.

Ce procédé de corrélation fine est mis en œuvre dans le système de traitement de l'ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images.

Ce procédé permet une nouvelle conception des systèmes spatiaux d'acquisition et de photographie aptes à acquérir le couple stéréoscopique d'images. Un coefficient stéréoscopique (b/h) proche de 0.02 limite les directions de visées homologues des capteurs CCD à une valeur inférieure à \pm un degré.

5 Un nouveau type de système spatial d'acquisition permettant l'acquisition du couple stéréoscopique d'images est représenté à la figure 9.

Contrairement aux systèmes d'acquisition de l'art antérieur, le système d'acquisition selon la présente invention comporte un instrument d'acquisition unique (non représenté) comprenant un système optique unique (non représenté) et deux
10 capteurs CCD 31, 32 symétriques dans le plan focal optique.

Chaque capteur CCD représenté à la figure 9 est une barrette constituée de détecteurs 33a, 33b, 33c. Ces détecteurs 33a, 33b, 33c sont par exemple des photodiodes électroniques sensibles CCD à la lumière et capable de convertir le signal lumineux en un courant électrique proportionnel à l'intensité de cette lumière. Ces détecteurs 33a,
15 33b, 33c sont placés côte à côte, en ligne et forment la barrette 33. Chaque détecteur 33a, 33b, 33c est chargé de l'observation d'un pixel. Chaque détecteur 33a, 33b, 33c capte la lumière provenant d'un pixel de terrain.

Le principe de fonctionnement d'un tel système d'acquisition d'image stéréoscopique dans le cas spatial est le suivant.

20 Chaque barrette 33, 34 permet l'acquisition d'une ligne d'image. La barrette 33 permet l'acquisition d'une ligne de la première image, et la barrette 34 l'acquisition d'une ligne de la deuxième image.

La première image et la deuxième image du couple stéréoscopique sont donc acquises ligne par ligne par les barrettes CCD 33, 34 au fur et à mesure de l'avancement
25 du satellite sur son orbite (entre le temps t et $t+\Delta t$).

Les lignes d'images acquises par les premières et deuxièmes barrettes 33, 34 sont stockées dans des moyens mémoire.

Une fois les deux images 1, 2 acquises, le système d'acquisition envoie (par des moyens de communication sans fil) le couple stéréoscopique d'images 1, 2 au système de traitement. Ce système de traitement est préférentiellement basé au sol et permet l'appariement des points du couple.

5 Dans le cas d'un système d'acquisition spatiale les deux barrettes introduites dans le plan focal peuvent être remplacées par deux matrices (chaque matrice étant constituée d'un ensemble de détecteurs CCD répartis en lignes et colonnes) également situées dans le plan focal.

Ceci peut être réalisé également avec un appareil photographique non spatial.
10 Dans le cas d'un appareil photographique, le système d'acquisition du couple stéréoscopique d'images comportera un capteur optoélectronique comprenant un système optique unique et deux capteurs CCD symétriques dans le plan focal.

Le procédé d'appariement fin d'un couple stéréoscopique d'images mis en œuvre dans le système de traitement reste valable pour les systèmes d'acquisition comprenant
15 un instrument spatial unique constitué de deux matrices ou de deux barrettes dès lors que les perturbations d'attitudes sont corrigées ou négligeables.

REVENDICATIONS

1. Système de traitement pour un ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images (1, 2) comprenant un système d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images à coefficient stéréoscopique de quelques centièmes et le système de traitement du couple stéréoscopique acquis, caractérisé en ce que le système de traitement comporte :
- des moyens aptes à traiter les deux images (1, 2) du couple stéréoscopique, selon au moins une direction de traitement et selon différents niveaux de résolution du plus grossier au plus fin, lesdits moyens de traitement comprenant des moyens qui, pour chaque changement de niveau de résolution, sont aptes à :
 - déterminer, en chaque point de la première image (1), une fenêtre de corrélation (3) optimale,
 - calculer, par corrélation avec les fenêtres de corrélation déterminées, les écarts de position entre chaque point (40) de la première image (1) et son homologue radiométrique (41) dans la deuxième image (2),
 - obtenir, pour le niveau de résolution courant, une carte des écarts de position entre chaque point (40) de la première image et son homologue radiométrique (41) dans la deuxième image,
 - effectuer un recalage barycentrique des points de ladite carte obtenue,
 - des moyens aptes à obtenir, pour le niveau de résolution le plus fin, la carte des écarts de position entre chaque point de la première image (1) et son homologue radiométrique dans la deuxième image (2).
2. Système de traitement selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens aptes à traiter les deux images du couple comprennent en outre :
- des moyens aptes à effectuer une convolution des images (1, 2) du couple par une fenêtre de convolution,

- des moyens aptes à effectuer un zoom de taille 2 des images (1, 2) du couple stéréoscopique.

3. Système de traitement selon la revendication 1 ou la revendication 2, caractérisé en ce que les moyens aptes à déterminer la fenêtre de corrélation optimale en chaque point de la première image comprennent :

- des moyens aptes à calculer une courbure de la première image pour chaque taille de fenêtre de corrélation (3),

- des moyens aptes à calculer une courbure de l'image de bruit pour chaque taille de fenêtre de corrélation (3),

- des moyens aptes à calculer, pour chaque taille de fenêtre de corrélation, le rapport (SNRc) des courbures précédentes,

et des moyens aptes à choisir la plus petite taille de fenêtre de corrélation telle que ledit rapport soit supérieur à un paramètre d'exhaustivité saisi par l'utilisateur.

4. Système de traitement selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les moyens aptes à traiter les deux images comprennent en outre des moyens aptes à effectuer une interpolation de la deuxième image (2) grâce à une carte des écarts de position obtenue pour un niveau de résolution précédent.

5. Système de traitement selon la revendication 4, caractérisé en ce que les moyens aptes à traiter les deux images comprennent en outre :

- des moyens aptes à rejeter les points homologues (40, 41) issus de fenêtres de corrélation (3) de plus grandes tailles et contenant des fenêtres de corrélation (3) de plus petites tailles,

- des moyens aptes à rejeter les points homologues (40, 41) de rayons de courbure vérifiant une condition de rejet après interpolation de la deuxième image (2),

- des moyens aptes à compléter itérativement, dans la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant, des points d'écarts de position lacunaires en fonction des points d'écarts de position existants,
- des moyens aptes à lisser la carte des écarts de position correspondant au
- 5 niveau de résolution courant par une fenêtre de convolution,
- des moyens aptes à composer la carte des écarts de position calculée pour le
- niveau de résolution courant avec la carte des écarts de position calculée pour le
- précédent niveau de résolution afin de mettre à jour ladite carte des écarts de
- position calculée pour le niveau de résolution précédent.

10

6. Système de traitement selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte en outre des moyens aptes à rejeter les points homologues vérifiant une condition de rejet, lesdits moyens aptes à rejeter les points homologues comprenant :

15

- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer sur la première image (1) les courbures de ses deux points voisins suivant chaque direction de traitement,
- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer l'écart inférieur des courbures des 4 connexes au point courant de la première image (1),
- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer, dans la deuxième
- 20 image (2), son point homologue interpolé par la carte des écarts de position,
- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer l'écart entre sa courbure et celle du point homologue,
- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à rejeter le point homologue si cet écart est plus important que l'écart inférieur calculé sur la première image (1).

25

7. Procédé d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images à coefficient stéréoscopique de quelques centièmes, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes :
- de traitement grâce à des moyens de traitement des deux images (1, 2) du couple stéréoscopique, selon au moins une direction de traitement et selon

différents niveaux de résolution du plus grossier au plus fin, en, pour chaque changement de niveau de résolution :

- déterminant, en chaque point de la première image (1), une fenêtre de corrélation (3) optimale,
- calculant, par corrélation avec les fenêtres de corrélation déterminées, les écarts de position entre chaque point (40) de la première image (1) et son homologue radiométrique (41) dans la deuxième image (2),
- obtenant, pour le niveau de résolution courant, une carte des écarts de position entre chaque point (40) de la première image et son homologue radiométrique (41) dans la deuxième image,
- effectuant un recalage barycentrique des points de ladite carte obtenue,
- d'obtention, pour le niveau de résolution le plus fin, de la carte des écarts de position entre chaque point de la première image (1) et son homologue radiométrique dans la deuxième image (2).

8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'il comporte en outre l'étape :

- d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images (1, 2) par un instrument d'acquisition unique (30) destiné à fonctionner avec des coefficients stéréoscopiques de quelques centièmes et comprenant deux capteurs CCD (31, 32) dans le plan focal optique (19'), chaque capteur (31) permettant l'acquisition d'une image (1) du couple.

9. Procédé selon la revendication 7 ou la revendication 8, caractérisé en ce qu'il comporte une étape consistant à traiter grâce à des moyens de traitement les deux images (1, 2) du couple stéréoscopique selon une direction épipolaire.

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 à 9, caractérisé en ce qu'il comporte une étape consistant à traiter grâce à des moyens de traitement les deux

images (1, 2) du couple stéréoscopique selon une direction épipolaire et une direction orthogonale à la direction épipolaire.

5 11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 à 10, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une étape de saisie par un utilisateur d'au moins un paramètre d'exhaustivité correspondant au choix d'un rapport signal sur bruit de corrélation suivant chaque direction de traitement.

10 12. Procédé selon l'une des revendications 7 à 11, caractérisé en ce qu'il comporte en outre les étapes d'acquisition :

- d'une image de bruit,
- du type de la fenêtre de corrélation,
- d'une direction épipolaire pour chaque image (1, 2) du couple pour un coefficient stéréoscopique moyen,
- 15 - d'au moins une valeur de l'écart de position maximum suivant chaque direction de traitement.

13. Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce que le procédé comprend en outre une étape de prétraitement des données consistant à :

- 20 - calculer un nombre de niveaux de résolution suivant chaque direction de traitement en fonction de chaque valeur de l'écart de position maximum,
- filtrer les images (1, 2) du couple stéréoscopique d'images par convolution avec une fenêtre de convolution,
- filtrer l'image de bruit par convolution avec ladite fenêtre de convolution,
- 25 - interpoler dans une géométrie épipolaire le couple stéréoscopique d'images.

14. Procédé selon l'une des revendications 7 à 13, caractérisé en ce que l'étape de traitement des images comprend en outre les étapes consistant à :

- effectuer une convolution des images (1, 2) du couple par une fenêtre de convolution,
- effectuer un zoom de taille 2 des images (1, 2) du couple stéréoscopique.

5 15. Procédé selon la revendication 11, caractérisé en ce que l'étape de détermination de la fenêtre de corrélation optimale consiste à, pour chaque point de la première image :

- calculer une courbure de la première image pour chaque taille de fenêtre de corrélation (3),
- calculer une courbure de l'image de bruit pour chaque taille de fenêtre de
- 10 corrélation (3),
- calculer, pour chaque taille de fenêtre de corrélation, le rapport (SNRc) des courbures précédentes,

et à choisir la plus petite taille de fenêtre de corrélation telle que ledit rapport soit supérieur à chaque paramètre d'exhaustivité saisi par l'utilisateur.

15 16. Procédé selon l'une des revendications 7 à 15, caractérisé en ce que l'étape de traitement des images comprend en outre une étape consistant à effectuer une interpolation de la deuxième image (2) grâce à une carte des écarts de position obtenue pour un niveau de résolution précédent.

20 17. Procédé selon la revendication 16, caractérisé en ce que l'étape de traitement des images comprend en outre les étapes consistant à :

- rejeter les points homologues issus de fenêtres de corrélation de plus grandes tailles et contenant des fenêtres de corrélation de plus petites tailles,
- 25 - rejeter les points homologues (40, 41) de rayons de courbure vérifiant une condition de rejet après interpolation de la deuxième image (2),
- compléter itérativement, dans la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant, des points d'écarts de position lacunaires en fonction des points d'écarts de position existants,

- lisser la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant par une fenêtre de convolution,
- composer la carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution courant avec la carte des écarts de position calculée pour le précédent niveau de résolution afin de mettre à jour ladite carte des écarts de position calculée pour le

5

18. Procédé selon l'une des revendications 17, caractérisé en ce que l'étape de rejet des points homologues vérifiant une condition de rejet consiste à, pour le point courant :

10

- calculer sur la première image (1) les courbures de ses deux points voisins suivant chaque direction de traitement,
- calculer l'écart inférieur des courbures des 4 connexes au point courant de la première image,

15

- calculer, dans la deuxième image, son point homologue interpolé par la carte des écarts de position,
- calculer l'écart entre sa courbure et celle du point homologue,
- rejeter le point homologue si cet écart est plus important que l'écart inférieur calculé sur la première image.

20

19. Procédé selon l'une des revendications 7 à 18, caractérisé en ce que l'étape d'obtention, pour le niveau de résolution le plus fin, de la carte des écarts de position, comprend l'obtention :

25

- d'au moins un tableau représentant la carte des écarts de position suivant chaque direction de traitement,
- d'au moins un tableau représentant une carte des tailles des fenêtres de corrélation employées en tout point non rejeté de la première image, suivant chaque direction de traitement.

20. Procédé selon l'une des revendications 7 à 19, caractérisé en ce que les fenêtres de convolution et de corrélation utilisées sont des fenêtres de convolution et de corrélation de type prolate.

5 21. Ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images (1, 2) comprenant un système d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images et un système de traitement du couple stéréoscopique acquis caractérisé :

en ce que le système d'acquisition du couple stéréoscopique comporte un instrument d'acquisition unique (30) comprenant deux capteurs CCD (31, 32) dans
10 le plan focal optique, chaque capteur CCD (31, 32) permettant l'acquisition d'une image (1, 2), le système d'acquisition étant destiné à fonctionner avec des coefficients stéréoscopiques de quelques centièmes, et

en ce que le système de traitement comporte :

- des moyens aptes à traiter les deux images (1, 2) du couple stéréoscopique, selon au
15 moins une direction de traitement et selon différents niveaux de résolution du plus grossier au plus fin, lesdits moyens de traitement comprenant des moyens qui, pour chaque changement de niveau de résolution, sont aptes à :

- déterminer, en chaque point de la première image (1), une fenêtre de corrélation (3) optimale,

20 - calculer, par corrélation avec les fenêtres de corrélation déterminées, les écarts de position entre chaque point (40) de la première image (1) et son homologue radiométrique (41) dans la deuxième image (2),

- obtenir, pour le niveau de résolution courant, une carte des écarts de position entre chaque point (40) de la première image et son homologue radiométrique (41) dans la deuxième image,

25 - effectuer un recalage barycentrique des points de ladite carte obtenue,

- des moyens aptes à obtenir, pour le niveau de résolution le plus fin, la carte des écarts de position entre chaque point de la première image (1) et son homologue radiométrique dans la deuxième image (2).

22. Système d'acquisition pour un ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images (1, 2) comprenant le système d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images et un système de traitement du couple stéréoscopique acquis,

5

caractérisé en ce que le système d'acquisition du couple stéréoscopique comporte un instrument d'acquisition unique (30) comprenant deux capteurs CCD (31, 32) dans le plan focal optique, chaque capteur CCD (31, 32) permettant l'acquisition d'une image (1, 2) d'un couple stéréoscopique d'images, le système d'acquisition étant

10

destiné à fonctionner avec des coefficients stéréoscopiques de quelques centièmes.

1 / 10

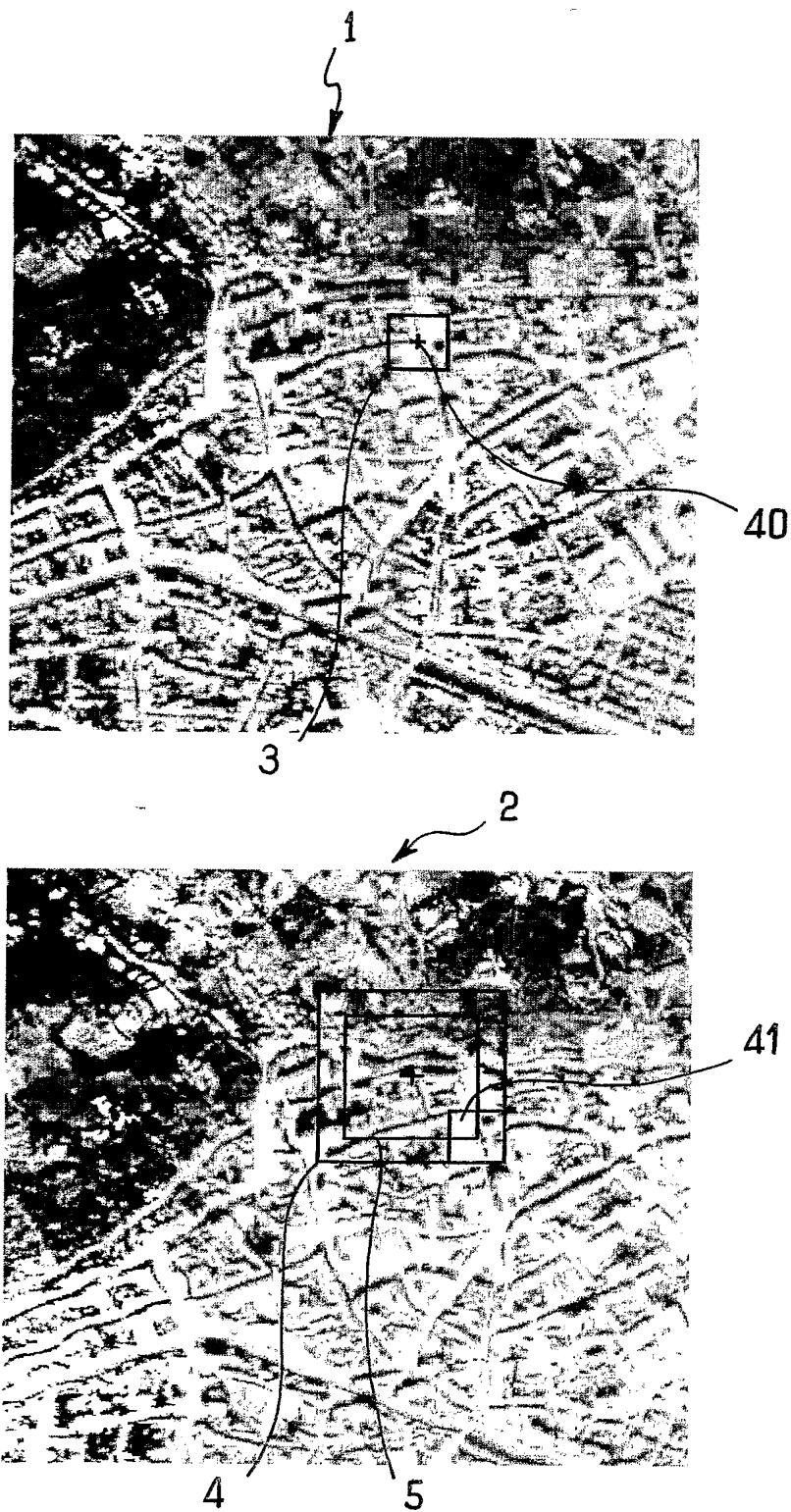


FIG. 1

2 / 10

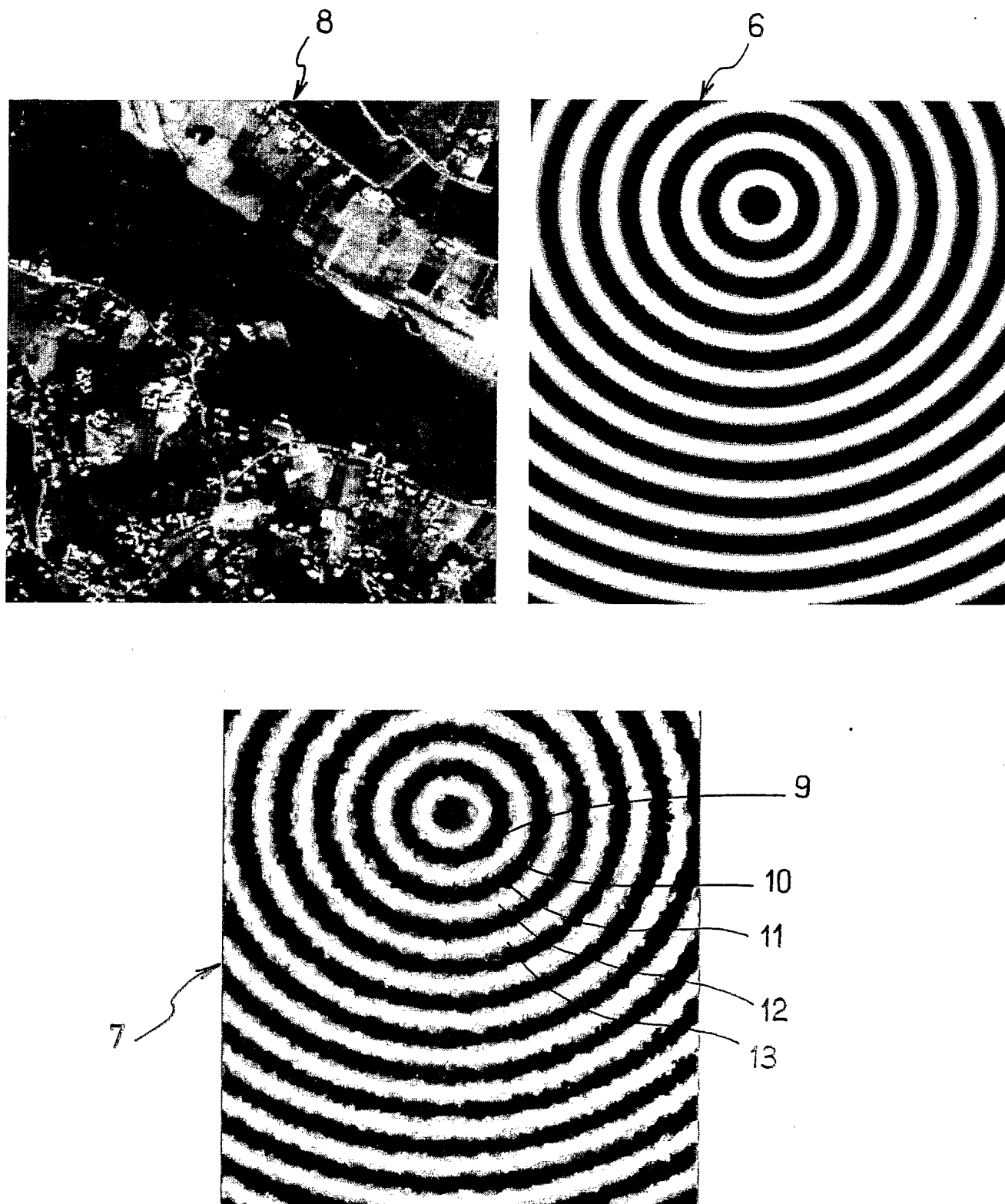


FIG.2

3 / 10

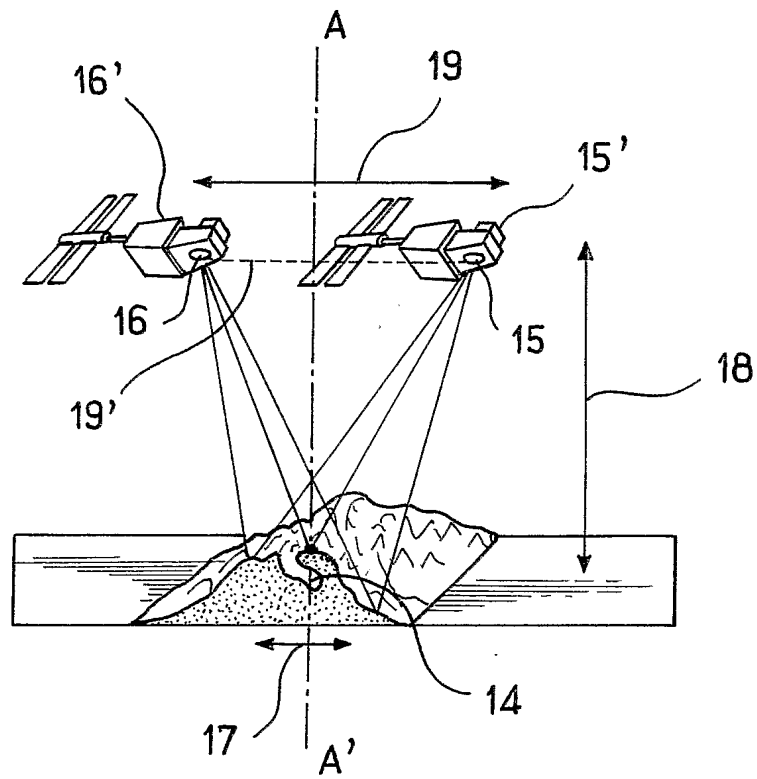
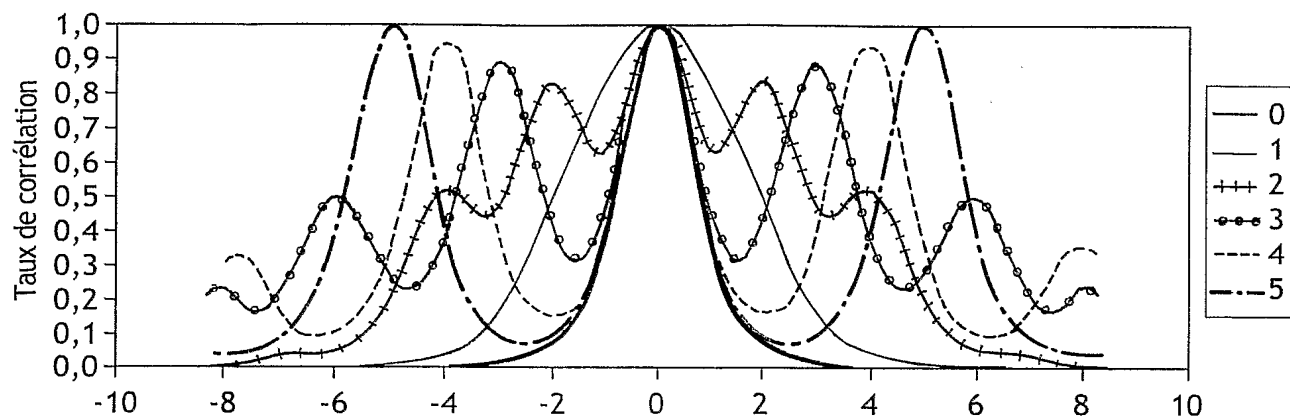
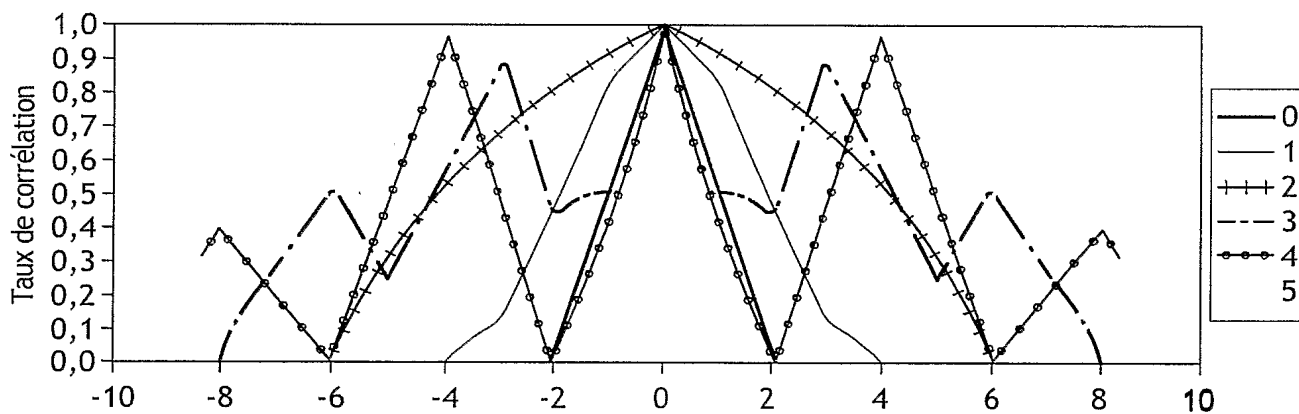
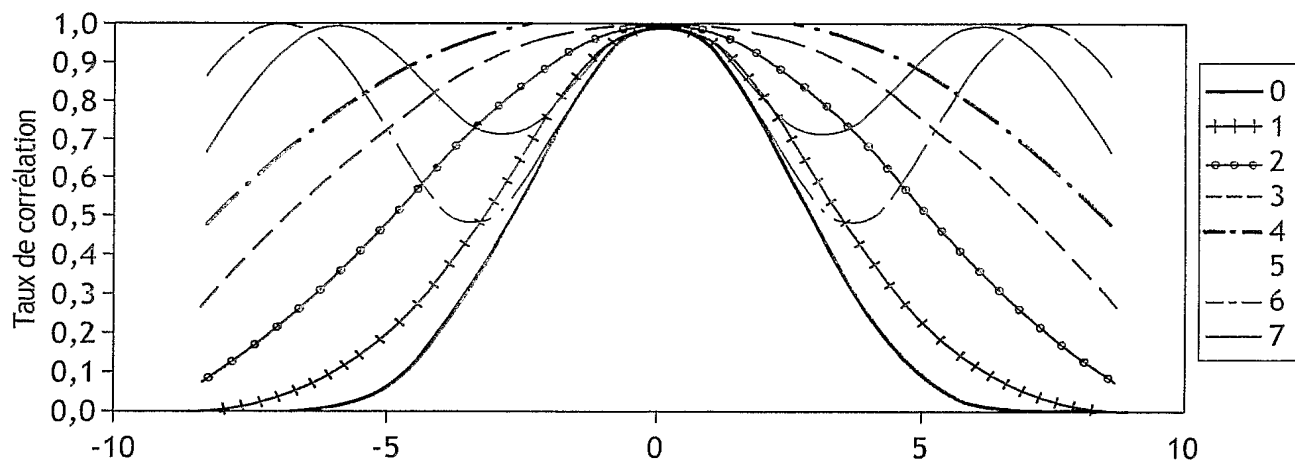
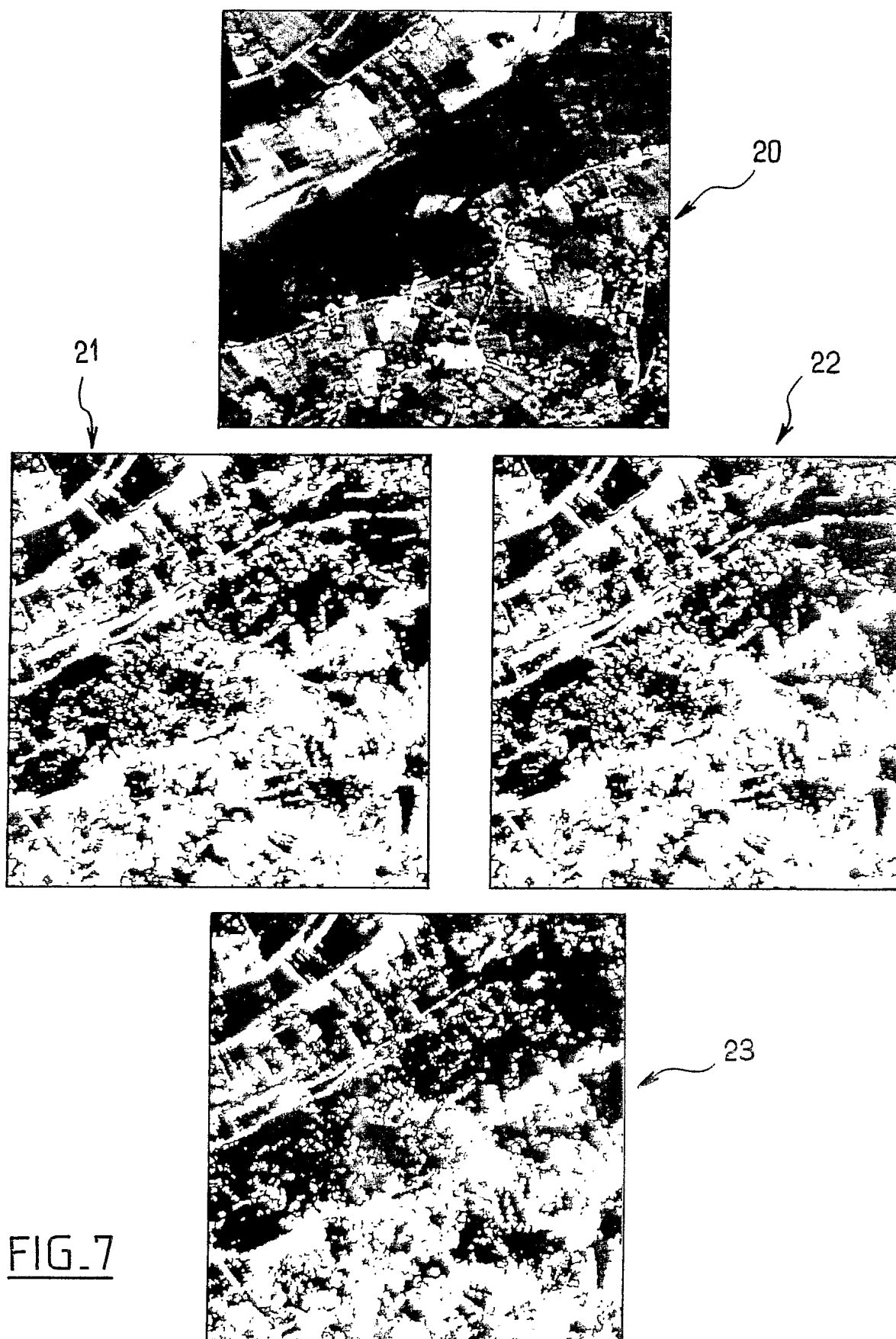


FIG. 3

4 / 10

FIG. 4FIG. 5FIG. 6

5 / 10



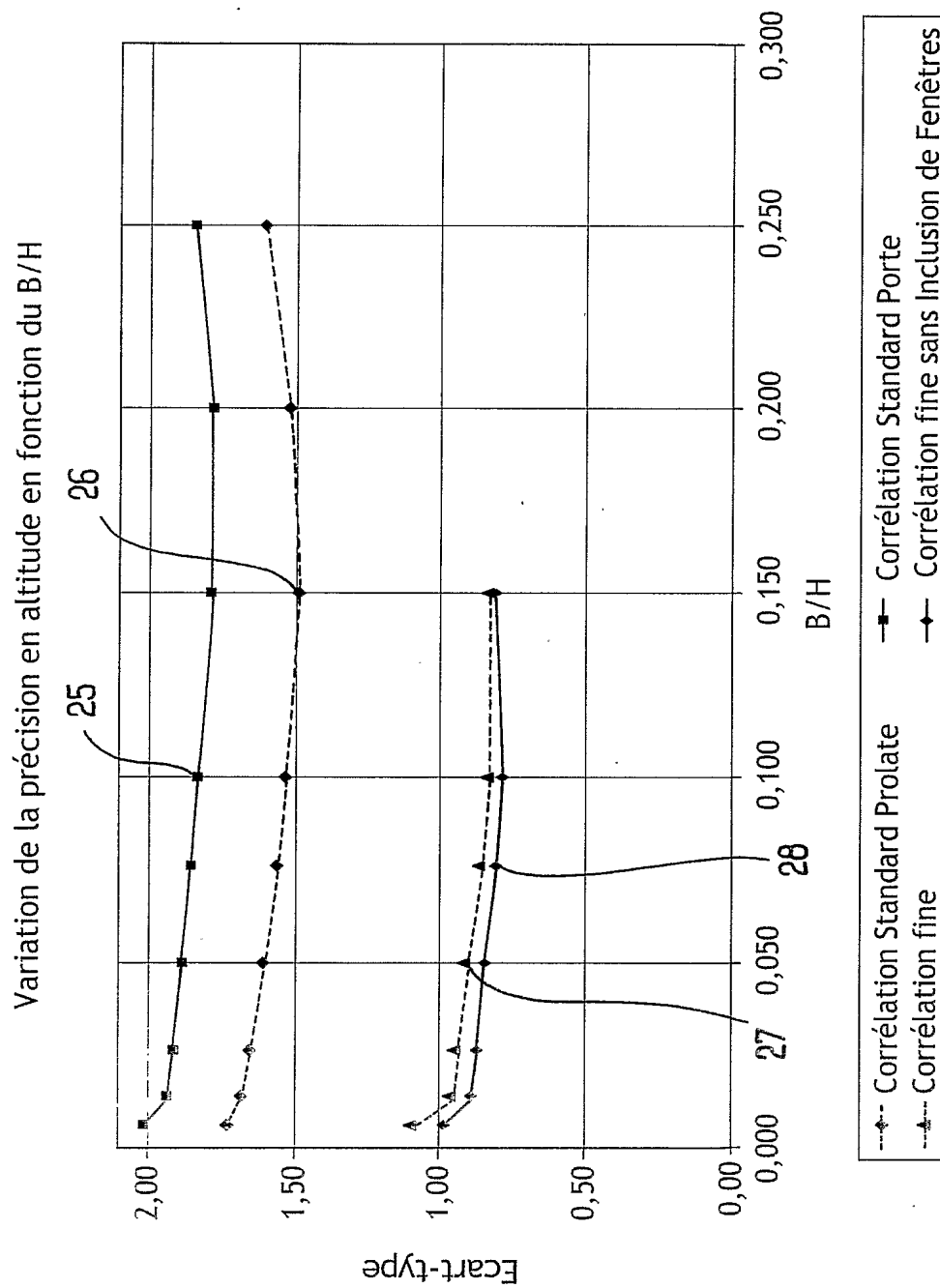
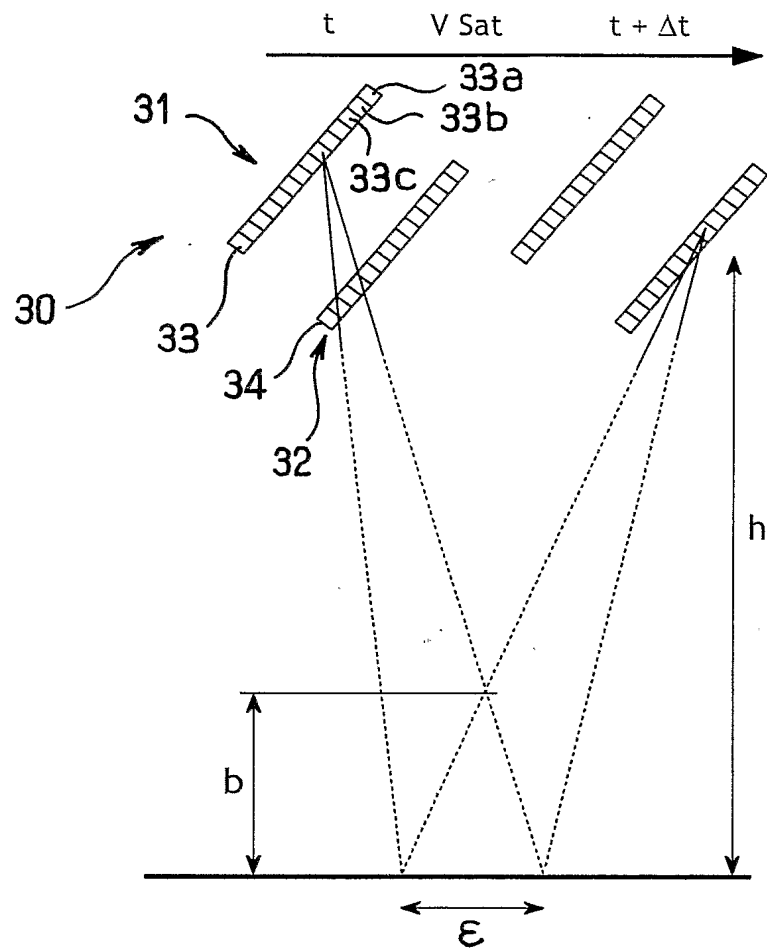
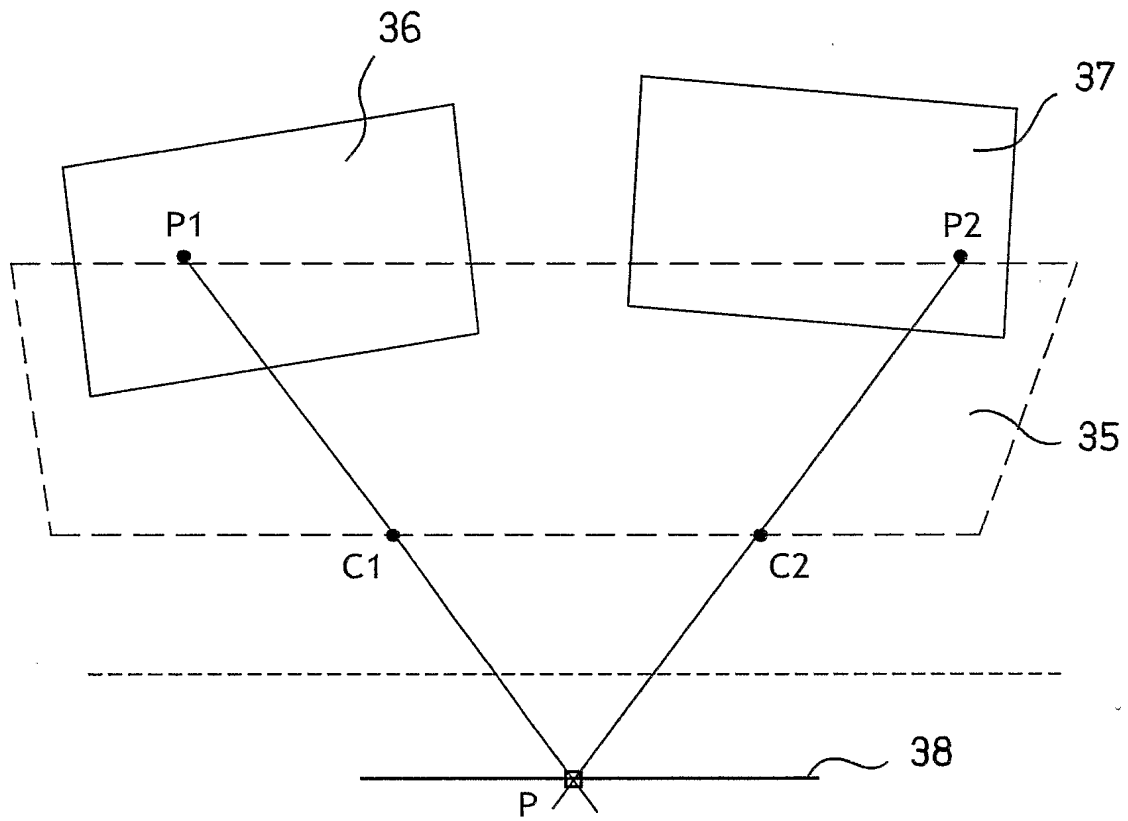


FIG. 8

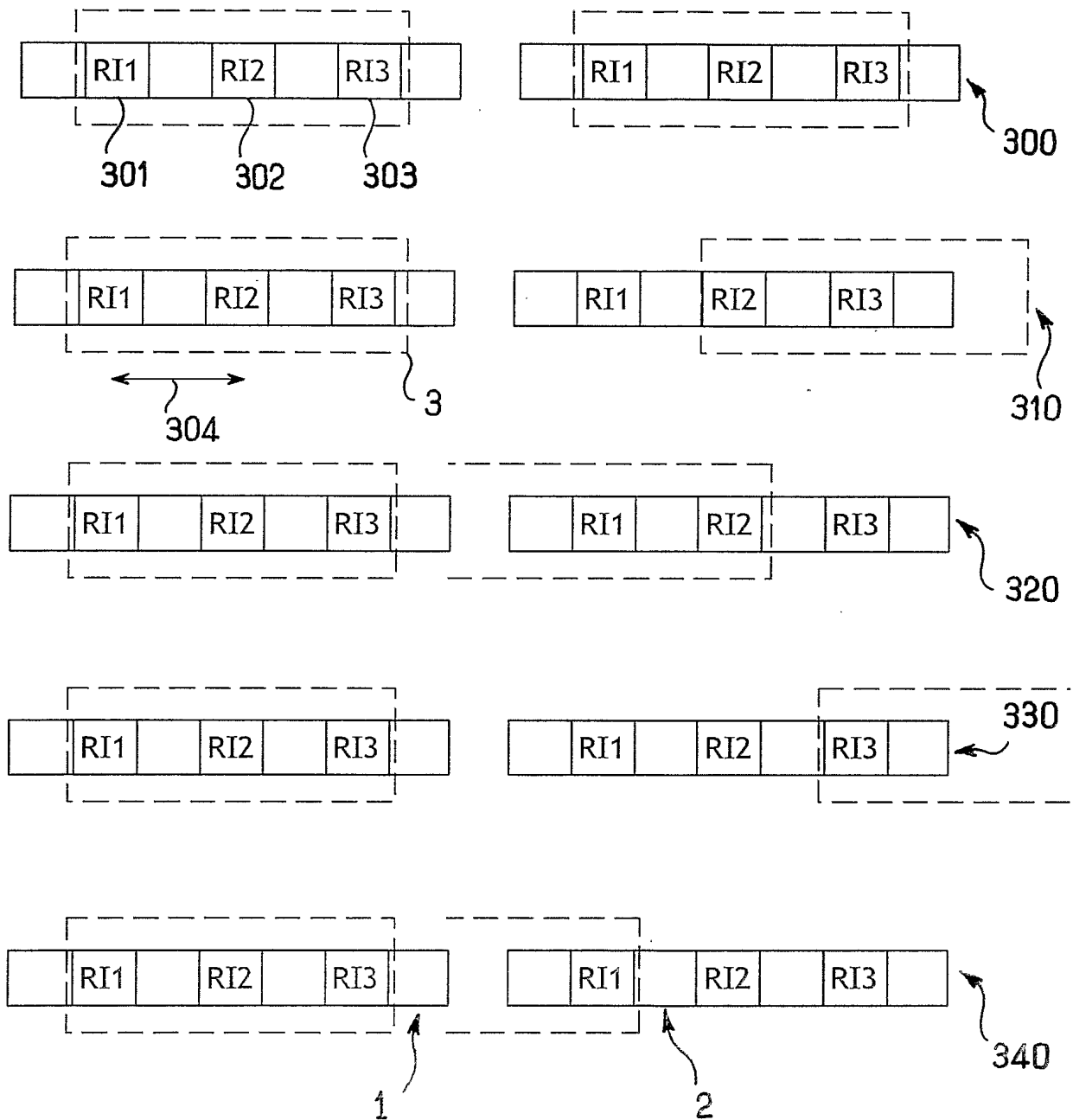
7 / 10

FIG. 9

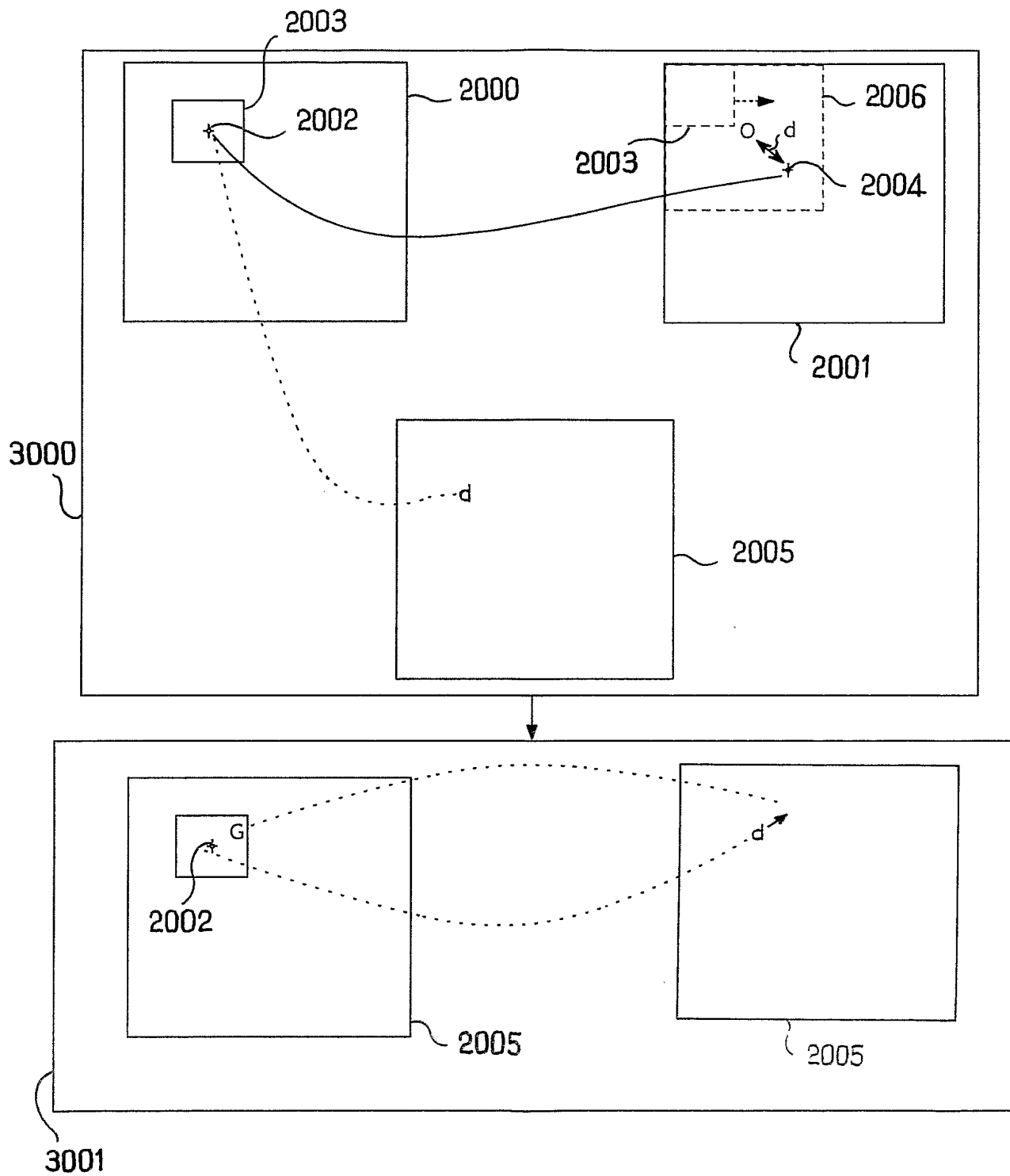
8 / 10

FIG_10

9 / 10

FIG. 11

10 / 10

FIG. 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/FR2005/000752

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G06T7/00 H04N13/00 G01C11/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H04N G06T G01C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2002/113864 A1 (BORNER ANKO ET AL) 22 August 2002 (2002-08-22) paragraphs '0005!', '0019!', '0020!; figure 1	22
X	EP 0 037 530 A (DEUTSCHE FORSCH LUFT RAUMFAHRT) 14 October 1981 (1981-10-14) page 2, last paragraph	22
X	US 2002/135468 A1 (SCHOFIELD KENNETH ET AL) 26 September 2002 (2002-09-26) paragraphs '0037!', '0038!; figure 3	22
A	US 5 995 681 A (BELL DAVID M ET AL) 30 November 1999 (1999-11-30) column 3, line 6 - line 16 ----- -/--	1-21

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

A document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

E earlier document but published on or after the International filing date

L document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

O document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

P document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

T later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

X document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

Y document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

Z document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

26 July 2005

Date of mailing of the international search report

02/08/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Montanari, M

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/FR2005/000752

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 963 664 A (ANANDAN PADMANABHAN ET AL) 5 October 1999 (1999-10-05) column 4, line 56 - column 5, line 3 column 8, line 23 - line 45 -----	1-21
A	US 5 550 937 A (BELL DAVID M ET AL) 27 August 1996 (1996-08-27) column 2, line 16 - line 32 -----	1-22

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/FR2005/000752

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2002113864	A1	22-08-2002	DE 19633868 A1 DE 59705104 D1 WO 9808053 A1 EP 0918979 A1 JP 2000516341 T	23-04-1998 29-11-2001 26-02-1998 02-06-1999 05-12-2000
EP 0037530	A	14-10-1981	DE 3012601 A1 EP 0037530 A2	08-10-1981 14-10-1981
US 2002135468	A1	26-09-2002	US 6396397 B1 US 6222447 B1 US 5949331 A US 2005083184 A1 US 2002056805 A1 US 2004051634 A1 US 2002017985 A1 US 2004200948 A1	28-05-2002 24-04-2001 07-09-1999 21-04-2005 16-05-2002 18-03-2004 14-02-2002 14-10-2004
US 5995681	A	30-11-1999	NONE	
US 5963664	A	05-10-1999	CA 2225400 A1 EP 0842498 A2 JP 11509946 T WO 9701135 A2	09-01-1997 20-05-1998 31-08-1999 09-01-1997
US 5550937	A	27-08-1996	NONE	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Dem... Internationale No
PCT/FR2005/000752

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 G06T7/00 H04N13/00 G01C11/02

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
CIB 7 H04N G06T G01C

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 2002/113864 A1 (BORNER ANKO ET AL) 22 août 2002 (2002-08-22) alinéas '0005!, '0019!, '0020!; figure 1 -----	22
X	EP 0 037 530 A (DEUTSCHE FORSCH LUFT RAUMFAHRT) 14 octobre 1981 (1981-10-14) page 2, dernier alinéa -----	22
X	US 2002/135468 A1 (SCHOFIELD KENNETH ET AL) 26 septembre 2002 (2002-09-26) alinéas '0037!, '0038!; figure 3 -----	22
A	US 5 995 681 A (BELL DAVID M ET AL) 30 novembre 1999 (1999-11-30) colonne 3, ligne 6 - ligne 16 ----- -/-	1-21

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

° Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- *T* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- *X* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- *Y* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- *&* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

26 juillet 2005

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

02/08/2005

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Montanari, M

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande Internationale No
PCT/FR2005/000752

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 5 963 664 A (ANANDAN PADMANABHAN ET AL) 5 octobre 1999 (1999-10-05) colonne 4, ligne 56 - colonne 5, ligne 3 colonne 8, ligne 23 - ligne 45 -----	1-21
A	US 5 550 937 A (BELL DAVID M ET AL) 27 août 1996 (1996-08-27) colonne 2, ligne 16 - ligne 32 -----	1-22

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande Internationale No
PCT/FR2005/000752

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2002113864	A1	22-08-2002	DE 19633868 A1	23-04-1998
			DE 59705104 D1	29-11-2001
			WO 9808053 A1	26-02-1998
			EP 0918979 A1	02-06-1999
			JP 2000516341 T	05-12-2000
EP 0037530	A	14-10-1981	DE 3012601 A1	08-10-1981
			EP 0037530 A2	14-10-1981
US 2002135468	A1	26-09-2002	US 6396397 B1	28-05-2002
			US 6222447 B1	24-04-2001
			US 5949331 A	07-09-1999
			US 2005083184 A1	21-04-2005
			US 2002056805 A1	16-05-2002
			US 2004051634 A1	18-03-2004
			US 2002017985 A1	14-02-2002
			US 2004200948 A1	14-10-2004
US 5995681	A	30-11-1999	AUCUN	
US 5963664	A	05-10-1999	CA 2225400 A1	09-01-1997
			EP 0842498 A2	20-05-1998
			JP 11509946 T	31-08-1999
			WO 9701135 A2	09-01-1997
US 5550937	A	27-08-1996	AUCUN	